

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ - ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΤΙΠΡΥΠΙΑΝΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική μελέτη ευστάθειας ροής υγρού υμένα

Σαμαντάς Αθανάσιος

Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός, Π.Θ.



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6882/1
Ημερ. Εισ.: 05-02-2009
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
620.106 4
ΣΑΜ

© 2008 Σαμαντάς Αθανάσιος

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2)

Πενταμελής Επιτροπή

Πρώτος εξεταστής (επιβλέπων)	Δρ. Μποντόζογλου Βασίλειος , <i>Καθηγητής</i> Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος εξεταστής	Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ , <i>Αναπλ. Καθηγητής</i> , Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Τ.Ε.Ι. Λάρισας
Τρίτος εξεταστής	Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος , <i>Επίκουρος Καθηγητής</i> , Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τέταρτος εξεταστής	Δρ. Βαλουγεώργης Δημήτριος , <i>Καθηγητής</i> Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πέμπτος εξεταστής	Δρ. Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόριος , <i>Καθηγητής</i> Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Μποντόζογλου Βασίλειο για την ανάθεση της μεταπτυχιακής εργασίας και των ιδεών που μου έδωσε για την διεκπεραίωσή της.

Ταυτόχρονα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον αναπληρωτή καθηγητή κ. Βλαχογιάννη Μιχαήλ για τη διαρκή βοήθεια και επίβλεψή του.

Τέλος, θέλω να αποδώσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου. Η στήριξή της ήταν διαρκής και ανυπολόγιστη.

Περίληψη

Η ροή υγρού υμένα τόσο σε επίπεδο όσο και σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα έχει μελετηθεί αρκετά ως προς την ευστάθειά της και τους κυματισμούς της. Στην παρούσα εργασία μελετάται η ευστάθεια του υμένα εξετάζοντας την επίδραση ορισμένων παραγόντων. Συγκεκριμένα στο επίπεδο τοίχωμα μελετήθηκε η επίδραση του μεγέθους και του είδους της διαταραχής καθώς επίσης και η επίδραση της συχνότητας. Επιπλέον μελετήθηκε η επίδραση του πλάτους στην ανάλυση ευστάθειας κάτι το οποίο δεν έχει πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα. Η ανάλυση ευστάθειας συνεχίστηκε και στο περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα και συγκεκριμένα στο ημιτονοειδές και στο ορθογωνικό. Ειδικότερα στο ορθογωνικό τοίχωμα συγκεκριμένης διαμόρφωσης εξετάστηκε η επίδραση της συχνότητας της επιβαλλόμενης διαταραχής με τις αντίστοιχες τιμές συχνότητας με αυτές του επιπέδου τοιχώματος.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή στην οποία περιγράφεται γενικά η εφαρμογή των λεπτών υμένων. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις προηγούμενων ερευνών. Το τρίτο κεφάλαιο περιγράφει την πειραματική διάταξη και την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την έρευνα και γίνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική ενασχόληση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</u>	13
1.1 Στόχος εργασίας	13
1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα	13
1.3 Επιλογή εύρους μελετούμενων παραμέτρων	14
1.4 Δομή της εργασίας	15
<u>Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</u>	16
2.1 Ροή υμένα σε επίπεδο τοίχωμα	16
2.1.1 Θεωρία- Υπολογισμοί μόνιμης ροής	16
2.1.2 Ρευστοδυναμική ευστάθεια	18
2.2 Ευστάθεια ροής υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο κανάλι	20
2.2.1 Βασική ροή	20
2.3 Ροή υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα	21
2.3.1. Θεωρία-Υπολογισμοί μόνιμης ροής	21
2.3.2. Ρευστοδυναμική ευστάθεια	24
2.4 Πειράματα	25
<u>Κεφάλαιο 3: Πειραματική διαδικασία</u>	34
3.1 Πειραματική συσκευή	34
3.1.1 Το αρχικό πρότυπο	34
3.1.2 Η τροποποίηση	36
3.2. Χειρισμός της πειραματικής συσκευής	36
3.2.1. Ρύθμιση της γωνίας κλίσης	36
3.2.2. Ευθυγράμμιση του καναλιού	37
3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική	39
3.4 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής	40
3.5 Ιδιότητες ρευστών	41
3.6 Εκτέλεση του πειράματος	42
3.6.1 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής	42
3.6.2 Αναλυτική περιγραφή των πειραμάτων	43
<u>Κεφάλαιο 4: Πειραματικά αποτελέσματα</u>	45
4.1 Η μεθοδολογία διαχωρισμού της μετάβασης από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή	48
4.2 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Re	52
4.3 Η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Re από το είδος και το μέγεθος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής στο επίπεδο τοίχωμα	54
4.3.1 Εξάρτηση από το μέγεθος της διαταραχής	54
4.3.2 Εξάρτηση από τη μορφή της διαταραχής	55
4.4 Η επίδραση της συχνότητας της διαταραχής στη ροή υγρού υμένα για το επίπεδο τοίχωμα	56

4.5 Η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Reynolds από το πλάτος του καναλιού στο επίπεδο τοίχωμα	61
4.6 Επίδραση τοιχώματος στην ευστάθεια του υγρού υμένα	68
4.6.1 Ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=2\text{mm}$ $2b=1\text{ mm}$	68
4.6.2 Ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12\text{mm}$ $2b=2\text{mm}$	70
4.6.3 Ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=50\text{mm}$ $2b=10\text{mm}$	71
4.6.4 Τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12\text{mm}$ $2b=0.2\text{mm}$	72
4.6.5 Τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12\text{mm}$ $2b=0.8\text{mm}$	73
4.6.6 Τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=20\text{mm}$ $2b=2\text{mm}$	75
4.6.7 Τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=24\text{mm}$ $2b=0.2\text{mm}$	76
4.7 Επίδραση της συχνότητας διαταραχής στην ευστάθεια του υγρού υμένα στο ορθογωνικό τοίχωμα χαρακτηριστικών $L=12\text{mm}$ $2b=0.8\text{mm}$	77
4.8 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα	81
<u>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα- προτάσεις</u>	82
5.1 Συμπεράσματα	82
5.2 Προτάσεις	83

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο.

Σχήμα 2.2: Γραφική απεικόνιση εξέλιξης (α) συναγωγικής και (β) απόλυτης αστάθειας.

Σχήμα 2.3: Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα.

Σχήμα 2.4: Πρόβλεψη του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας από τον Wang (1981).

Σχήμα 2.5: Σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων των θεωριών στρωτής και έρπουσας ροής για το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας ($l=0,002\text{m}$, $\phi=60^\circ$).

Σχήμα 2.6: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re για περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. () $Ka=3365$, (♦) $Ka=1102$, (—) $Re=5/6\cot\theta$.

Σχήμα 2.7: Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας σε 4 διαδοχικές χρονικές στιγμές ($\Delta t=0,1\text{sec}$) (α) ημιτονοειδής μορφή και (β) μορφή με περισσότερες αρμονικές.

Σχήμα 2.8: (α) Το πέρασμα ενός πλήρους αναπτυγμένου μοναχικού κύματος πάνω από το διαμορφωμένο τοίχωμα. (β) το πέρασμα του ίδιου κύματος χωρίς την επίδραση του τοιχώματος.

Σχήμα 2.9: Πεταλοειδή κύματα (horse – shoe waves)

Σχήμα 2.10: Η εμφάνιση των εγκάρσιων βαθουλωμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια.

Σχήμα 2.11: Οι διαφορετικές περιοχές ροής πάνω από τοίχωμα μεγάλου πλάτους διαμόρφωσης για χαμηλούς αριθμούς Re κατά Aksel et al.

Σχήμα 2.12: Σύγκριση των μετρήσεων του πάχους του υγρού υμένα με τις θεωρητικές προσεγγίσεις. Τα διάσπαρτα τετράγωνα υποδεικνύουν τα σημεία μέτρησης. Τα αποτελέσματα του Wang φαίνονται με τις συμπαγή γραμμή και οι θεωρητικές προσεγγίσεις σαν διάσπαρτη καμπύλη. Το κοίλωμα και η κορυφή του κυματισμού, κυμαίνεται από 0 mm έως 100 mm. Μήκος κύματος 200 mm, πλάτος 4 mm και $Re: 10^{-3}$, α) 10^{-1} , β) γωνία κλίσης 30°

Σχήμα 2.13: Ροή υγρού υμένα όπως οπτικοποιήθηκε, με την παράταξη διακριτών εικόνων. Το κυματοειδές τοίχωμα είναι στο αριστερό κάτω μέρος, ενώ ο υμένας διακρίνεται στην περιοχή με τα πολλά στίγματα. Η ελεύθερη επιφάνεια απεικονίζεται ως η λεπτή φωτεινή γραμμή. Κάποια ίχνη πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια, οφείλονται στην αντανάκλαση του εκπεμπόμενου φωτός από την ελεύθερη επιφάνεια. Στην εικόνα 1a δεν μπορεί να παρατηρηθεί κάποια ζώνη ανακυκλοφορίας. Στην εικόνα 1b φαίνεται η γέννηση μίας μικρής δίνης. Στην 1c φαίνεται ξεκάθαρα η δίνη

Σχήμα 2.14: Ζώνες ανακυκλοφορίας στον πυθμένα του τοιχώματος. Η κύρια ροή του ρευστού είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά. Η εικόνα (α) δείχνει τη σχηματιζόμενη δίνη στο μέγιστο μέγεθός της, παρατηρηθείσα σε μικρό αριθμό Reynolds. Η (β) δείχνει τη ζώνη ανακυκλοφορίας του υλικού B200 silicone oil σε πάχος υγρού υμένα 14,2 mm. Η ανύψωση της δίνης στο αντίθετο προς τη ροή τριοδιάστατο σημείο συμβολίζεται με Δd και φαίνεται στην εικόνα b, με γωνία κλίσης 45° και αριθμό Reynolds: 0.2 (α), 228 (β)

Σχήμα 2.15 Μέγεθος των δινών συναρτήσει του πάχους του υμένα.

Σχήμα 2.16 Πεδίο ταχυτήτων των ζωνών ανακυκλοφορίας στο αυλάκι του πυθμένα (a) μέγιστη ταχύτητα ανακυκλοφορίας συναρτήσει του πάχους του υμένα (b)

Σχήμα 3.1 πειραματική διάταξη

Σχήμα 3.2 καθορισμός της γωνίας κλίσης με αλφαδολάστιχο

Σχήμα 3.3 Ευθυγραμμισμένο και μη ευθυγραμμισμένο κανάλι

Σχήμα 3.4. Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής

Σχήμα 3.5 Σύστημα διαταραχής

Σχήμα 3.6. Πάχος υγρού υμένα κατά Nusselt για επίπεδο τοίχωμα.

Σχήμα 4.1 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15$ cm και $-x_o=65$ cm), για διάλυμα 30% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=5^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 9.5$, b) $Re = 11.4$, c) $Re = 12.07$, d) $Re = 14.65$, e) $Re = 16.01$, f) $Re = 17.91$, g) $Re = 22.25$, h) $Re = 28.22$

Σχήμα 4.2 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15$ cm και $-x_o=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=166$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 2.32$, b) $Re = 2.61$, c) $Re = 2.89$, d) $Re = 3.17$, e) $Re = 3.39$, f) $Re = 3.78$, g) $Re = 4.2$, h) $Re = 4.7$

Σχήμα 4.3 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15$ cm και $-x_o=65$ cm), για διάλυμα 56% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=83$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 5.03$, b) $Re = 5.61$, c) $Re = 6.32$, d) $Re = 7.04$, e) $Re = 7.86$, f) $Re = 8.77$, g) $Re = 9.73$, h) $Re = 10.92$

Σχήμα 4.4 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=5^\circ$ και $w=250$ mm

Σχήμα 4.5 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=166$ mm

Σχήμα 4.6 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=10^\circ$ και $w=83$ mm

Σχήμα 4.7 Η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Re από το ύψος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής για $\varphi=10^\circ$. Το μέγεθος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής είναι: 50μm (a,b,c,d) και 20μm (e,f,g,h) ενώ η συχνότητα είναι 0,16 Hz.

Σχήμα 4.8 Η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Re από το είδος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής για $\varphi=10^\circ$. Το μέγεθος της διαταραχής είναι 15 μm ενώ η συχνότητα είναι 0.5 Hz. Η αστάθεια παρουσιάζεται σε $Re=9.20$.

Σχήμα 4.9 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15$ cm και $-x_o=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm, συχνότητας διαταραχής $f=0.5$ Hz για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 4.2$, b) $Re = 4.54$, c) $Re = 4.99$, d) $Re = 5.4$, e) $Re = 5.84$ και f) $Re = 6.30$

Σχήμα 4.10 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{ mm}$, συχνότητας διαταραχής $f=0.75\text{ Hz}$ για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 4.24$, b) $Re= 4.52$, c) $Re= 4.99$, d) $Re=5.25$, e) $Re=5.79$ και f) $Re=6.28$

Σχήμα 4.11 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{ mm}$, συχνότητας διαταραχής $f=1.75\text{ Hz}$ για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 4,53$, b) $Re= 4.72$, c) $Re= 5,14$, d) $Re=5,45$ και e) $Re=5.7$

Σχήμα 4.12 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{ mm}$, συχνότητας διαταραχής $f=0.5\text{ Hz}$ για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 3,2$, b) $Re= 3,5$, c) $Re= 3,85$ και d) $Re=4,17$

Σχήμα 4.13 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{ mm}$, συχνότητας διαταραχής $f=0.75\text{ Hz}$ για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 3,01$, b) $Re= 3,45$, c) $Re= 3,71$, d) $Re=4,10$ και e) $Re=5.93$

Σχήμα 4.14 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{ mm}$, συχνότητας διαταραχής $f=1.25\text{ Hz}$ για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 3,75$, b) $Re= 4,11$, c) $Re= 4,33$ και d) $Re=4,71$

Σχήμα 4.15 Η εξάρτηση του $Re_{critical}$ από τη συχνότητα της διαταραχής για γωνία κλίσης $\varphi= 10^\circ$ και $\varphi= 15^\circ$ για το επίπεδο τοίχωμα.

Σχήμα 4.16 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για $\varphi=7^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=250\text{ mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{ mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re\approx 10.3$.

Σχήμα 4.17 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για $\varphi=10^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=250\text{ mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{ mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re\approx 7.1$.

Σχήμα 4.18 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για $\varphi=15^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=250\text{ mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{ mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re\approx 4.3$.

Σχήμα 4.19 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για $\varphi=5^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=166\text{ mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{ mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re\approx 17$.

Σχήμα 4.20 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για $\varphi=15^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=166\text{ mm}$

(a,b,c,d) & $w=83\text{mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re \approx 4.0$.

Σχήμα 4.21 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για $\varphi=20^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=166\text{mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re \approx 2.2$.

Σχήμα 4.22. Η εξάρτηση του κρίσιμου Re από το πλάτος του καναλιού α) Ο κρίσιμος Re συναρτήσει της γωνίας κλίσης β) Ο κρίσιμος Re συναρτήσει του πλάτους του καναλιού

Σχήμα 4.23 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{mm}$ και για τους παρακάτω αριθμούς Re : α) $Re = 2,61$, β) $Re = 3,04$, γ) $Re = 3,44$, δ) $Re = 3,96$, ε) $Re = 4,57$, ς) $Re = 5,05$

Σχήμα 4.24 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=250\text{mm}$ σε ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=2\text{mm}$ $2b=1\text{mm}$.

Σχήμα 4.25 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{mm}$ και για τους παρακάτω αριθμούς Re : α) $Re = 4.09$, β) $Re = 4.6$, γ) $Re = 5.10$, δ) $Re = 6.25$, ε) $Re = 7.14$, ς) $Re = 8.21$

Σχήμα 4.26 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=250\text{mm}$ σε ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12\text{mm}$ $2b=2\text{ mm}$

Σχήμα 4.27 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{mm}$ και για τους παρακάτω αριθμούς Re : α) $Re = 4.32$, β) $Re = 5.02$, γ) $Re = 5.37$, δ) $Re = 6.06$, ε) $Re = 6.72$, ς) $Re = 8.85$

Σχήμα 4.28 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=250\text{mm}$ σε ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=50\text{mm}$ $2b=10\text{ mm}$

Σχήμα 4.29 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{mm}$ και για τους παρακάτω αριθμούς Re : α) $Re = 3.52$, β) $Re = 4.12$, γ) $Re = 4.67$, δ) $Re = 5.26$, ε) $Re = 5.88$, ς) $Re = 6.61$

Σχήμα 4.30 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=250\text{mm}$ σε τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12\text{mm}$ $2b=0.2\text{ mm}$

Σχήμα 4.31 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{mm}$ και για τους παρακάτω αριθμούς Re : α) $Re = 6.56$, β) $Re = 7.20$, γ) $Re = 7.89$, δ) $Re = 8.66$, ε) $Re = 9.46$, ς) $Re = 10.29$

Σχήμα 4.32 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=250\text{mm}$ σε τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12\text{mm}$ $2b=0.8\text{ mm}$

Σχήμα 4.33 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 5.77$, b) $Re= 6.19$, c) $Re= 7.09$, d) $Re=7.55$, e) $Re=8.22$, f) $Re=8.54$

Σχήμα 4.34 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=250$ mm σε τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=20$ mm $2b=2$ mm

Σχήμα 4.35 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 3.09$, b) $Re= 3.50$, c) $Re= 4.03$, d) $Re=4.65$, e) $Re=5.31$, f) $Re=6.03$

Σχήμα 4.36 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=250$ mm σε τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=24$ mm $2b=0.2$ mm

Σχήμα 4.37 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm, συχνότητας διαταραχής $f=1.25$ Hz για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 7.43$, b) $Re= 7.67$, c) $Re= 8.01$, d) $Re=8.17$

Σχήμα 4.38 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm, συχνότητας διαταραχής $f=1.5$ Hz για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 7.36$, b) $Re= 7.84$, c) $Re= 7.92$, d) $Re=8.27$

Σχήμα 4.39 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm με συχνότητες διαταραχής : a) $f=0.25$ Hz , b) $f =0.5$ Hz , c) $f= 0.75$ Hz, d) $f= 1$ Hz, e) $f= 1.25$ Hz, f) $f=1.5$ Hz, g) $f= 1.75$ Hz και h) $f=2$ Hz

Σχήμα 4.40 Η εξάρτηση του $Re_{critical}$ από τη συχνότητα της διαταραχής για γωνία κλίσης $\varphi= 10^\circ$ και $\varphi= 15^\circ$ για το ορθογωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12$ mm $2b=0.8$ mm.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Στόχος εργασίας

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στα πλαίσια του προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών. Σκοπός της εκπόνησης, είναι η πειραματική μελέτη της ευστάθειας της ροής υγρού υμένα συναρτήσει του πλάτους του καναλιού ροής. Συγκεκριμένα μελετάται πως επηρεάζεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds, δηλαδή ο αριθμός Reynolds στον οποίο η ροή μεταπίπτει από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή, από τη μείωση του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας του ανοιχτού αγωγού.

Πέραν της βασικής μελέτης της εξάρτησης της ευστάθειας του υγρού υμένα από το πλάτος, μελετήθηκαν δύο ακόμα πτυχές στην ανάλυση της ευστάθειας. Ειδικότερα, μελετήθηκε η επίδραση του μεγέθους της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής καθώς επίσης και η μορφή της (κατακόρυφη, ημιτονοειδής). Όλα τα παραπάνω απαντώνται αναλυτικά στα κεφάλαια που παρατίθενται στη συνέχεια.

1.2 Εφαρμογές ροής υγρού υμένα

Με τον όρο ροή υγρού υμένα, εννοείται η ροή εκείνη στην οποία το πάχος του ρέοντος ρευστού είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του μεγέθη (μήκος και πλάτος). Η ροή υγρού υμένα λόγω βαρύτητας (ροή Nusselt) κατά μήκος επίπεδου τοιχώματος αποτελεί μια βασική ροή της ρευστομηχανικής και συναντάται σε πολυάριθμα βιομηχανικά συστήματα, όπως σε εφαρμογές επικάλυψης, εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες, στήλες απορρόφησης κ.ά. Λεπτοί υμένες χρησιμοποιούνται στις περισσότερες συσκευές μεταφοράς θερμότητας και μάζας, και ίσως ο κυριότερος λόγος της χρήσης αυτού του είδους ροής είναι η

ικανότητα των υγρών υμένων να μεταφέρουν θερμότητα και μάζα με χαμηλή υδραυλική αντίσταση.

Το πεδίο ροής στον υμένα συχνά επηρεάζει έντονα τους ρυθμούς μεταφοράς και κατά συνέπεια καθορίζει το βαθμό απόδοσης των συσκευών. Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα παραδείγματα αποτελούν οι συμπυκνωτές ατμού - όπου συνήθως η κύρια αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας προβάλλεται από τον υμένα του συμπυκνώματος -, οι εξατμιστήρες και οι ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις - στα τμήματα εκείνα όπου ο μηχανισμός του βρασμού είναι η εξατμιοση από την επιφάνεια του υγρού (και όχι η πυρηνογένεση στο τοίχωμα) - και οι συσκευές μεταφοράς μάζας όπου λαμβάνει χώρα απορρόφηση ελαφρά διαλυτού αερίου. Τα ίδια φαινόμενα ροής και ευστάθειας λεπτών υμένων καθορίζουν τα χαρακτηριστικά και άλλων τεχνολογικών και περιβαλλοντικών συστημάτων με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όπως για παράδειγμα τη συμπεριφορά πτερύγων αεροπλάνων κατά την πτήση υπό συνθήκες βροχόπτωσης (Pelekasis & Tsamopoulos 2001).

Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση των φαινομένων μεταφοράς, ενώ σε άλλες επιδιώκεται η ελαχιστοποίησή τους. Στην πρώτη περίπτωση ανήκουν οι περιπτώσεις συσκευών μεταφοράς μάζας ή θερμότητας (εναλλάκτες θερμότητας, αντιδραστήρες κ.ά.), στις οποίες απαιτούνται υψηλοί συντελεστές μεταφοράς, ενώ χαρακτηριστικό παράδειγμα της δεύτερης περίπτωσης είναι οι διεργασίες επίστρωσης λεπτών υμένων, όπου η παρουσία κυμάτων στην επιφάνεια επίστρωσης δεν είναι επιθυμητή.

Ωστόσο, στα περισσότερα συστήματα το ρευστό δεν ρέει πάνω σε τελείως επίπεδη επιφάνεια, κυρίως λόγω κατασκευαστικών ατελειών ή επικαθίσεων, και είναι αξιοσημείωτο ότι οι περισσότερες δημοσιευμένες εργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν επικεντρωθεί στη ροή σε επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα.

1.3 Επιλογή εύρους μελετούμενων παραμέτρων

Οι κύριες φυσικές και λειτουργικές παράμετροι που μεταβάλλονται στην παρούσα εργασία είναι το ιξώδες της υγρής φάσης, η παροχή του υμένα, η γωνία κλίσης του τοιχώματος, η μορφή της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής και φυσικά το πλάτος του καναλιού.

Πιο συγκεκριμένα, ως υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού και γλυκερίνης (30% - 80% κ.β. γλυκερίνη), ενώ οι παροχές που μελετήθηκαν εξασφάλιζαν τιμές του αριθμού Reynolds πάνω και κάτω από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds για κάθε κλίση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή του είδους του διαλύματος υπαγορευόταν από τη γωνία κλίσης.

Η επιλογή των κλίσεων του τοιχώματος που μελετήθηκαν (5° – 30°) υπαγορεύεται κυρίως από πειραματικούς περιορισμούς ενώ η εισαγωγή στο σύστημα συγκεκριμένης συχνότητας διαταραχής, δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου. Όσον αφορά τη μορφή της διαταραχής, εφαρμόστηκαν δύο είδη. Η πλειονότητα των πειραμάτων έγινε με εφαρμογή κατακόρυφης διαταραχής, ενώ σε συγκεκριμένες συνθήκες, εφαρμόστηκε ημιτονοειδής διαταραχή με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Μία ακόμη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν το μέγεθος της επιβαλλόμενης διαταραχής και η επίδρασή της στην ανάλυση της ευστάθειας του υγρού υμένα.

1.4 Δομή της εργασίας

Στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη ροή υγρού υμένα και την ευστάθεια της ροής, ξεκινώντας από τη βασική ροή σε επίπεδο τοίχωμα. Αναφέρονται οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο και η λύση που δόθηκε αρχικά από τον Nusselt. Γίνεται ανάλυση της θεωρίας γραμμικής ευστάθειας και η λύση που έχει προκύψει για ροή σε επίπεδο τοίχωμα. Στη συνέχεια περιγράφεται η ροή υγρού υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα συνοδευόμενη και αυτή από ανάλυση γραμμικής ευστάθειας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι γίνεται αναφορά τόσο σε πειραματικές μελέτες, οι οποίες είναι περιορισμένες, όσο και σε υπολογιστικές. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αρχικά, περιγράφεται η πειραματική διάταξη που υπάρχει στο εργαστήριο. Ακολουθεί η παρουσίαση της μεθόδου συλλογής των πειραματικών δεδομένων και η διαδικασία επεξεργασίας τους. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα επεξεργασμένα αποτελέσματα με διαγράμματα για την ορθή κατανόησή τους από τον αναγνώστη. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και γίνονται προτάσεις με μελλοντικό πειραματικό ενδιαφέρον.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Ροή υμένα σε επίπεδο τοίχωμα

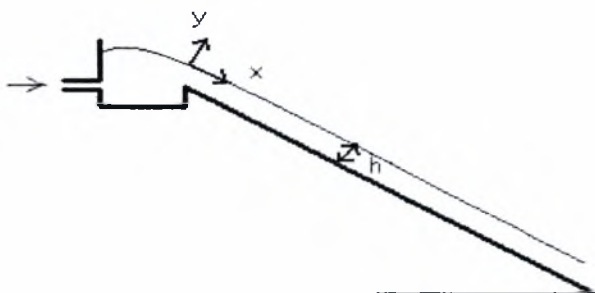
2.1.1 Θεωρία- Υπολογισμοί μόνιμης ροής

Η πιο απλή μορφή του προβλήματος της ροής σε κεκλιμένο επίπεδο είναι αυτή της ροής Nusselt. Θεωρούμε δισδιάστατη ροή υγρού υμένα κατά μήκος μιας κεκλιμένης επίπεδης επιφάνειας μήκους L (σχήμα 2.1). Η περιοχή αυτή μήκους L βρίσκεται πολύ μακριά από τα άκρα στα οποία μπαίνει και βγαίνει ο υμένας ώστε να μην επηρεάζεται λόγω αυτών, δηλαδή η ταχύτητα κατά την x διεύθυνση δεν εξαρτάται από το μήκος x . Θεωρούμε επίσης ότι το υγρό είναι σταθερής πυκνότητας και ιξώδους.

$$\left(\begin{array}{c} \text{εισροή} \\ x\text{-ορμής} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{εκροή} \\ x\text{-ορμής} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{άθροισμα δυνάμεων} \\ \text{(παραγωγή } x\text{-ορμής)} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{συσσώρευση} \\ \text{ορμής} \end{array} \right)$$

Θεωρούμε στοιχειώδη όγκο ελέγχου. Η x -ορμή μπαίνει στον όγκο ελέγχου με τη ροή και λόγω της ιξώδους αλληλεπίδρασης. Το ισοζύγιο x -ορμής είναι το εξής:

$$[(Wdy_x)(\rho u_x)|_x - (Wdy_x)(\rho u_x)|_{x+L}] + [(WL\tau_{xy})|_y - (WL\tau_{xy})|_{y+\delta y}] + WLy\sin\phi = 0 \quad (2.1-1)$$



Σχήμα 2.1: Ροή σε κεκλιμένο επίπεδο.

Με απλοποιήσεις παίρνουμε:

$$-\frac{d(\tau_{yx})}{dy} + \rho g \sin \phi = 0 \quad (2.1-2)$$

με: $\tau_{yx} = -\Delta \frac{du_x}{dy}$ (2.1-3)

Οι συνοριακές συνθήκες που διέπουν το πρόβλημα είναι:

$$\text{στο } y=0 \quad u_x(0)=0 \quad (2.1-4)$$

$$\text{στο } y=h \quad \tau_{yx}=0 \quad (2.1-5)$$

Με βάση τα παραπάνω η κατανομή της ταχύτητας δίνεται από τη σχέση:

$$u_x(y) = \left(\frac{\rho g \sin \phi}{2\mu} \right) y(2h - y) \quad \text{στο } y=h \quad (2.1-6)$$

Το ύψος του υμένα δίνεται, συναρτήσει της ογκομετρικής παροχής ανά μονάδα πλάτους, από τη σχέση:

$$h_N = \sqrt[3]{\frac{3q\mu}{\rho g \sin \phi}} \quad (2.1-7)$$

και συναρτήσει της μέσης ταχύτητας από τη σχέση:

$$h_N = \sqrt{\frac{3\mu \cdot u_o}{\rho g \sin \phi}} \quad (2.1-8)$$

Ενώ η μέγιστη ταχύτητα, u_{\max} , στην ελεύθερη επιφάνεια είναι:

$$u_{\max} = u_x(y=h) = \frac{\rho \cdot g \cdot \sin \phi \cdot h^2}{2 \cdot \mu} \quad (2.1-9)$$

Η κατανομή της πίεσης, p , στην y κατεύθυνση είναι:

$$\frac{dp}{dy} = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \Rightarrow p = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \cdot y + c_1 \quad (2.1-10)$$

Με συνοριακή συνθήκη:

➤ Για $y=h$ είναι $p=P_{\text{atm}}$

Επομένως, προκύπτει:

$$p = -\rho \cdot g \cdot \cos \phi \cdot (y - h) + P_{\text{atm}} \quad (2.1-11)$$

Αδιαστατοποιώντας το πρόβλημα μπορούμε να πούμε ότι η ροή περιγράφεται από τους αριθμούς Reynolds και Weber ή από τους Reynolds και Kapitza, οι οποίοι δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Re = \frac{u_o \cdot h_N}{\nu} = \frac{q}{\nu} \quad (2.1-12)$$

$$We = \frac{\gamma}{(\rho \cdot u_o^2 \cdot h_N)} \quad (2.1-13)$$

$$Ka = \frac{\cdot}{(\lambda \pi^{4/3} \cdot g^{1/3})} \quad (2.1-14)$$

όπου: u_o είναι η μέση ταχύτητα, h_N το πάχος του επίπεδου υμένα κατά Nusselt, ρ η πυκνότητα του ρευστού, γ η επιφανειακή τάση και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Συνήθως χρησιμοποιείται ο αριθμός Kapitza αντί του αριθμού Weber διότι είναι συνάρτηση μόνο των φυσικών ιδιοτήτων του ρευστού και ανεξάρτητος της παροχής.

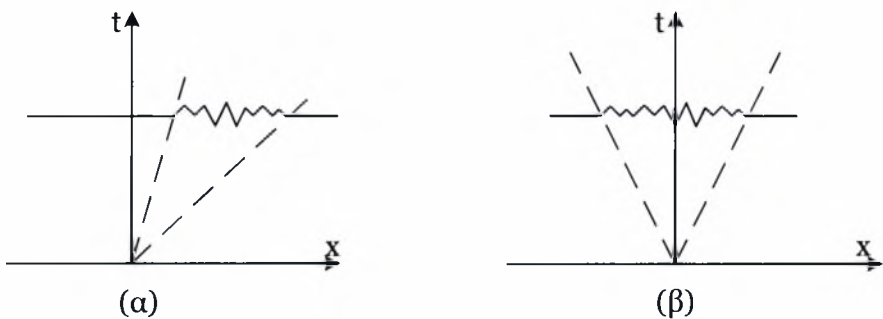
Η μαθηματική ανάλυση του γενικού προβλήματος ροής με ελεύθερη επιφάνεια είναι αρκετά δύσκολη εξαιτίας του γεγονότος ότι η μορφή της επιφάνειας είναι άγνωστη και πρέπει να υπολογιστεί. Το πρόβλημα είναι μη-γραμμικό και για τη λύση του απαιτούνται πολύπλοκες μαθηματικές μέθοδοι

2.1.2 Ρευστοδυναμική ευστάθεια

Συνήθως οι βιομηχανικές και εργαστηριακές εφαρμογές υπόκεινται σε μικρού πλάτους διαταραχές εξαιτίας διαφόρων λόγων, όπως είναι η δόνηση των συσκευών κατά τη λειτουργία τους. Επίσης, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις διαταραχή εισάγεται σε ένα σύστημα ώστε να επιτευχθεί μια επιθυμητή κατάσταση, όπως η ενίσχυση της ανάμιξης ρευστών. Οπότε είναι πιθανόν φυσικές ή τεχνητές διαταραχές να ενισχύονται με το χρόνο ή το χώρο οδηγώντας σε μη μόνιμη κίνηση ή σε μια νέα κατάσταση [Pozrikidis, 1997].

Η συμπεριφορά μιας διαταραχής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της και από τη δομή της αδιατάραχτης κατάστασης, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση αντιστοιχεί στη *βασική ροή*. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι οι διαταραχές παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά που εξαρτάται από τιμές αδιάστατων αριθμών που περιγράφουν τη βασική ροή, όπως για παράδειγμα ο αριθμός Reynolds. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις η διαταραχή αυξάνει και παρασύρεται κατάντη (ή και ανάντη) της ροής και η αρχική θέση επιβολής της τελικά ηρεμεί. Η εξέλιξη αυτή χαρακτηρίζεται ως *συναγωγικά ασταθής* (convective instability). Αντίθετα, στις περιπτώσεις όπου η διαταραχή απλώνεται σταδιακά στο

μεγαλύτερο τμήμα του πεδίου ροής και ειδικότερα η θέση επιβολής της δεν ηρεμεί, τότε η εξέλιξη αυτή χαρακτηρίζεται ως *απόλυτα ασταθής* (absolute instability). Οι αστάθειες αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2 [Drazin, 2002]. Παραδείγματα συναγωγικών ασταθειών είναι το οριακό στρώμα, η ροή υγρού υμένα και η δέσμη, ενώ απόλυτης αστάθειας η θερμαινόμενη δέσμη και η ροή λόγω περιστρεφόμενου δίσκου [Μποντόζογλου, 2006].



Σχήμα 2.2. Γραφική απεικόνιση εξέλιξης (α) συναγωγικής και (β) απόλυτης αστάθειας.

Ένας τρόπος εκτίμησης της ευστάθειας μιας ροής είναι να υποβληθεί η ροή σε μια μεγάλη κλίμακα διαταραχών διαφόρων μορφών και να παρατηρηθεί η διαδοχική εξέλιξη τους. Αν όλες οι διαταραχές σβήνουν η ροή χαρακτηρίζεται *ευσταθής* (stable), ενώ αν συγκεκριμένες διαταραχές ενισχύονται η ροή είναι *ασταθής* (unstable).

Η συμπεριφορά μιας διαταραχής μπορεί να μελετηθεί θεωρητικά επιλύοντας τις εξισώσεις κίνησης και συνέχειας με χρήση των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών. Όμως, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι πιθανές διαταραχές είναι αναρίθμητες είναι μάταιο να επιχειρηθεί να μελετηθούν όλες οι πιθανές διαταραχές και επομένως πρέπει να εφαρμοστεί μια εναλλακτική μέθοδος. Ένας τρόπος είναι να θεωρηθεί ότι το μέγεθος της διαταραχής είναι και παραμένει μικρό κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος και στη συνέχεια να *γραμμικοποιηθεί* η εξίσωση κίνησης ως προς την ταχύτητα της βασικής κατάστασης και να λυθεί για ένα μεγάλο εύρος αρχικών συνθηκών χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους. Αυτού του είδους η προσέγγιση αποτελεί την *ανάλυση γραμμικής ευστάθειας*. Ακόμα και μετά τη γραμμικοποίηση μια γενική λύση σε αναλυτική μορφή μπορεί να βρεθεί μόνο για περιορισμένες ροές με χρήση της *ανάλυσης ιδιομορφών* (normal mode analysis), η οποία εξετάζει τη συμπεριφορά διαταραχών που αυξάνουν ή σβήνουν εκθετικά με το χρόνο.

Αν η ανάλυση γραμμικής ευστάθειας δείξει ότι συγκεκριμένες διαταραχές αυξάνουν με το χρόνο, η ροή είναι σίγουρα ασταθής. Ωστόσο, το αντίστροφο ισχύει μόνο στην περίπτωση στην οποία το πλάτος της διαταραχής είναι και παραμένει μικρό συνέχεια, γιατί τα μη γραμμικά φαινόμενα που έχουν θεωρηθεί αμελητέα μπορεί να ευθύνονται για την ασταθή συμπεριφορά. Υπάρχουν

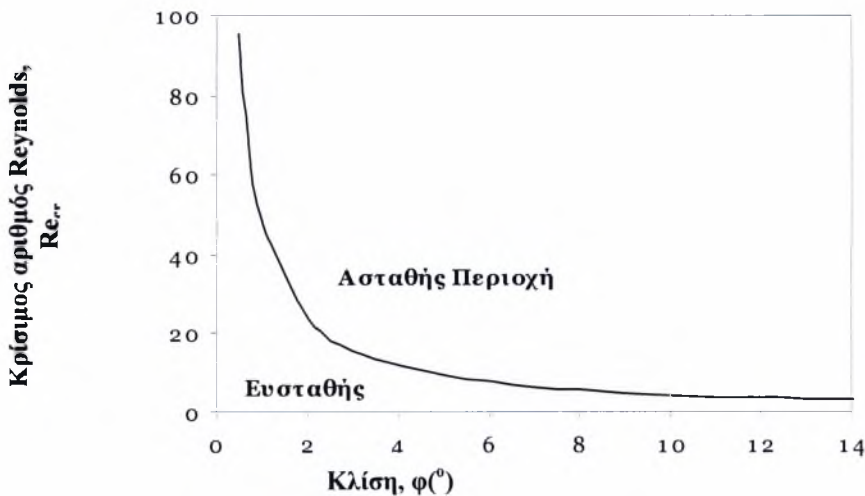
περιπτώσεις όπου μη γραμμικά φαινόμενα μπορεί να επιβραδύνουν ή ακόμα και να εξαφανίζουν την πιθανότητα ανάπτυξης ασταθών διαταραχών και να οδηγούν σε μια νέα μόνιμη ή περιοδική κατάσταση [Drazin, 1997].

Ανάλογα με τη δομή της βασικής ροής και το είδος της διαταραχής, οι μη μόνιμες συνιστώσες μπορεί να αυξάνουν ή να σβήνουν τοπικά ή συνολικά. Αν το μέγεθος της διαταραχής αυξάνει, παραμένει σταθερό ή σβήνει με το χρόνο τότε η διαταραχή ονομάζεται, αντίστοιχα, *ευσταθής*, *οριακά ευσταθής* ή *ασταθής*. Αν όλες οι διαταραχές σβήνουν η βασική ροή είναι *γραμμικά ευσταθής*, αλλά αν συγκεκριμένες διαταραχές αυξάνουν είναι *γραμμικά ασταθής*.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθούν οι περιορισμοί της θεωρίας γραμμικής ευστάθειας. Μια ροή που είναι ευσταθής σύμφωνα με τη θεωρία γραμμικής αστάθειας δεν είναι σίγουρο ότι μπορεί να επιτευχθεί και στην πράξη. Μη γραμμικά φαινόμενα και μικρές αποκλίσεις από την υποτιθέμενη ιδανική γεωμετρία της ροής, εξαιτίας για παράδειγμα τραχύτητας του τοιχώματος, μπορεί να ευθύνονται για ασταθείς συμπεριφορές της ροής [Μποντόζογλου, 2006].

2.2 Ευστάθεια ροής υγρού υμένα σε επίπεδο κεκλιμένο κανάλι

2.2.1 Βασική ροή



Σχήμα 2.3. Καμπύλη αστάθειας ροής υγρού υμένα.

Όταν ο αριθμός Re αυξηθεί πέρα από τον κρίσιμο για τη συγκεκριμένη κλίση, τότε η διαταραχή άπειρου μήκους παραμένει ουδέτερα ασταθής ενώ άλλη μικρότερου μήκους (α_{cr}) γίνεται η πλέον ασταθής. Έτσι, η ασταθής περιοχή καθορίζεται από δύο ουδέτερα ευσταθείς καμπύλες σε ένα διάγραμμα του κυματαριθμού, α , ως προς τον αριθμό Reynolds. Η πρώτη είναι η γραμμή $\alpha=0$ και η άλλη η καμπύλη α_{cr} ,

2.3 Ροή υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα

2.3.1. Θεωρία-Υπολογισμοί μόνιμης ροής

Η περίπτωση της ροής πάνω σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα, παρά τις πολυάριθμες εφαρμογές της, έχει μελετηθεί πολύ λιγότερο από ότι αυτή του επίπεδου τοιχώματος. Τα περισσότερα από τα διαθέσιμα αποτελέσματα αφορούν την μόνιμη ροή, δηλαδή το ισοδύναμο της λύσης Nusselt για το επίπεδο τοίχωμα. Πρώτος ο Wang (1981) επικεντρώνεται στη θεωρητική μελέτη της ροής ενός λεπτού υμένα σε κυματοειδές τοίχωμα, θεωρώντας μικρούς αριθμούς Re και μικρό πλάτος τοιχώματος (συγκρινόμενο με το πάχος του υμένα). Παρατήρησε λοιπόν ο Wang ότι στην ελεύθερη επιφάνεια εμφανίζεται μια στατική περιοδική δομή η οποία έχει μήκος κύματος ίδιο με αυτό του τοιχώματος. Σε μεγαλύτερους Re οι κυματοειδείς γραμμές του τοιχώματος προκαλούν ασταθή κύματα με μήκος κύματος παραπλήσιο με αυτό του τοιχώματος. Τα αποτελέσματα της επίδρασης του τοιχώματος στην ελεύθερη επιφάνεια συνοψίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 2.3. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας A εξαρτάται από τον λόγο λ του μέσου πάχους του υμένα (h) προς το μήκος κύματος του τοιχώματος (l) καθώς και από την παράμετρο D. Η παράμετρος D εκφράζει την επίδραση της διατμητικής τάσης και της γωνίας κλίσης του τοιχώματος σύμφωνα με την σχέση:

$$D = \cot \beta \cdot \sec M_\phi + \frac{1}{3} \cdot \frac{4 \cdot \eta^2 T}{\lambda \cdot \pi \cdot Q} \cdot \frac{h^3}{l^2} \quad (2.3-1)$$

όπου,

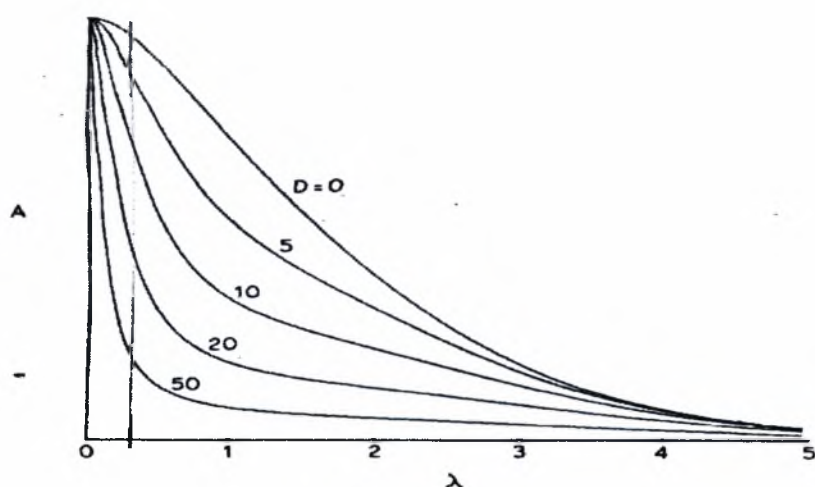
β : η μέση γωνία κλίσης του επιπέδου,

β_ϕ : γωνία των κυματοειδών γραμμών (wavy striations),

T: η επιφανειακή τάση και

Q: ο ρυθμός ροής (παροχή)

Από το σχήμα 2.4 φαίνεται ότι το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας αυξάνεται όσο μειώνεται το λ, δηλαδή όσο αυξάνεται το μήκος κύματος της διαμόρφωσης του κυματοειδούς τοιχώματος. Επίσης, το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας αυξάνεται με την μείωση του D δηλαδή με την αύξηση της γωνίας του τοιχώματος με την οριζόντιο ή την μείωση της επιφανειακής τάσης.



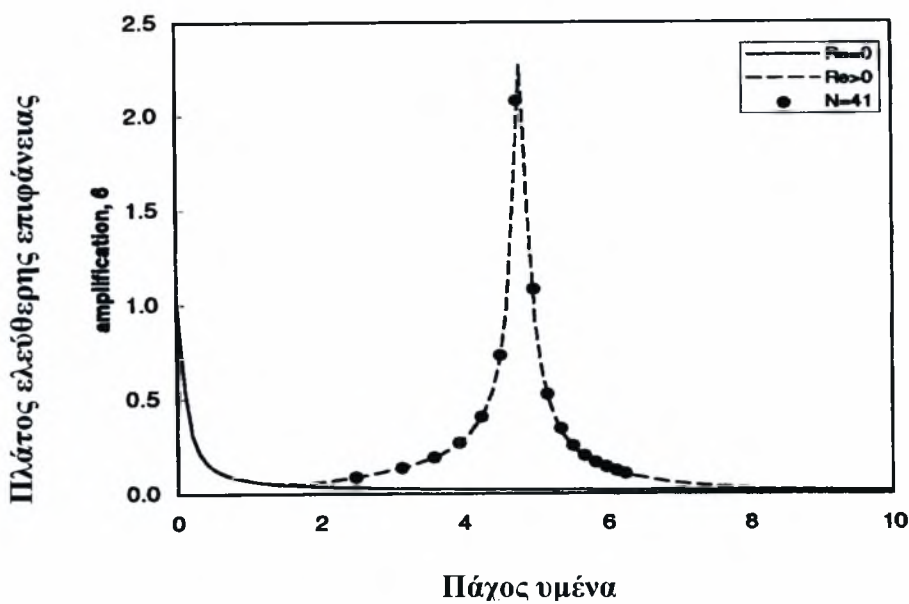
Σχήμα 2.4: Πρόβλεψη του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας από τον Wang (1981).

Επίσης, ο Pozrikidis (1988) υπολόγισε αριθμητικά την έρπουσα ροή πάνω από τοιχώματα με τυχαίο πλάτος και μορφή. Ενδιαφέροντα αποτελέσματα στην εργασία αυτή δόθηκαν για την περίπτωση του ημιτονοειδούς τοιχώματος. Έτσι, για σταθερό λόγο του πλάτους του τοιχώματος προς το μήκος κύματός του έχουμε μείωση του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας όσο μεγαλώνει ο Re . Επίσης, αν κρατήσουμε σταθερό το μήκος κύματος του τοιχώματος και την παροχή τότε αυξάνοντας το πλάτος του ημιτονοειδούς τοιχώματος το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας (A) αυξάνεται. Τέλος, αν θεωρήσουμε σταθερό το πλάτος του τοιχώματος και διατηρήσουμε σταθερή την παροχή, αυξάνοντας το μήκος κύματος l , αυξάνει το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας (A). Οι Dassori, Deiber & Cassano (1984) και οι Kang & Chen (1995) επέκτειναν την μελέτη σε διαχωρισμένη ροή μεταξύ δύο υγρών. Οι Shetty & Cerro (1994) απέδειξαν με ασυμπτωτική ανάλυση ότι με την παραδοχή αμελητέας αδράνειας και τριχοειδών φαινομένων η ροή ενός ιξώδους ρευστού κατάντη κυματοειδούς επιφάνειας υπακούει σε μια τοπική λύση Nusselt. Οι προηγούμενες μελέτες αφορούν ροή με αριθμό Re πολύ κοντά στο μηδέν (έρπουσα ροή). Επίσης κάποιες από τις παραπάνω εργασίες αφορούν ροή σε κατακόρυφο τοίχωμα με διαμορφώσεις μεγάλου πλάτους στην επιφάνεια.

Οι Aksel et al (2003, 2004) παρατήρησαν τόσο υπολογιστικά όσο και πειραματικά ότι στην περίπτωση που το πάχος του υμένα υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, δημιουργούνται και αναπτύσσονται δίνες στη ροή. Και στην περίπτωση αυτή η ροή είναι έρπουσα πάνω από τοίχωμα μεγάλου πλάτους διαμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, για συγκριτικά μικρά πλάτη τοιχώματος και μεγάλο πάχος υμένα, οι ροϊκές γραμμές ακολουθούν τη διαμόρφωση του τοιχώματος κοντά σε αυτό ενώ η ελεύθερη επιφάνεια είναι σχεδόν επίπεδη. Αυξάνοντας το πλάτος του κύματος έχουμε διαχωρισμό της ροής και εμφάνιση μιας περιοχής ανακυκλοφορίας. Οι δίνες αυτές εντοπίζονται στις κοιλότητες του τοιχώματος. Αυξάνοντας το πλάτος του τοιχώματος ακόμα περισσότερο

εμφανίζεται και δεύτερη ή και περισσότερες περιοχές ανακυκλοφορίας. Συγχρόνως, η εμφάνιση των δινών εξαρτάται και από το πάχος του υμένα. Κρατώντας το ύψος κύματος σταθερό και μειώνοντας το πάχος του υμένα οι δίνες εξασθενούν σε ένταση και μέγεθος, μέχρι που εξαφανίζονται για αρκετά μικρά πάχη υμένα. Η επίδραση της γωνίας κλίσης στις δίνες είναι αμελητέα τη στιγμή που το πάχος του υμένα είναι συγκριτικά μεγάλο.

Οι Bontozoglou & Paparolymerou (1997) μελέτησαν τη μόνιμη ροή υμένα σε ημιτονοειδές τοίχωμα σε πεπερασμένους αριθμούς Re , μέσα στα όρια της στρωτής ροής. Για μηδενικό αριθμό Reynolds ($Re=0$), τα αποτελέσματα συμπίπτουν με αυτά του Wang (1981), ενώ για μη μηδενικούς αριθμούς Reynolds παρατηρείται εντελώς διαφορετική συμπεριφορά. Ο υπολογισμός του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας συναρτήσει του πάχους του υμένα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5.

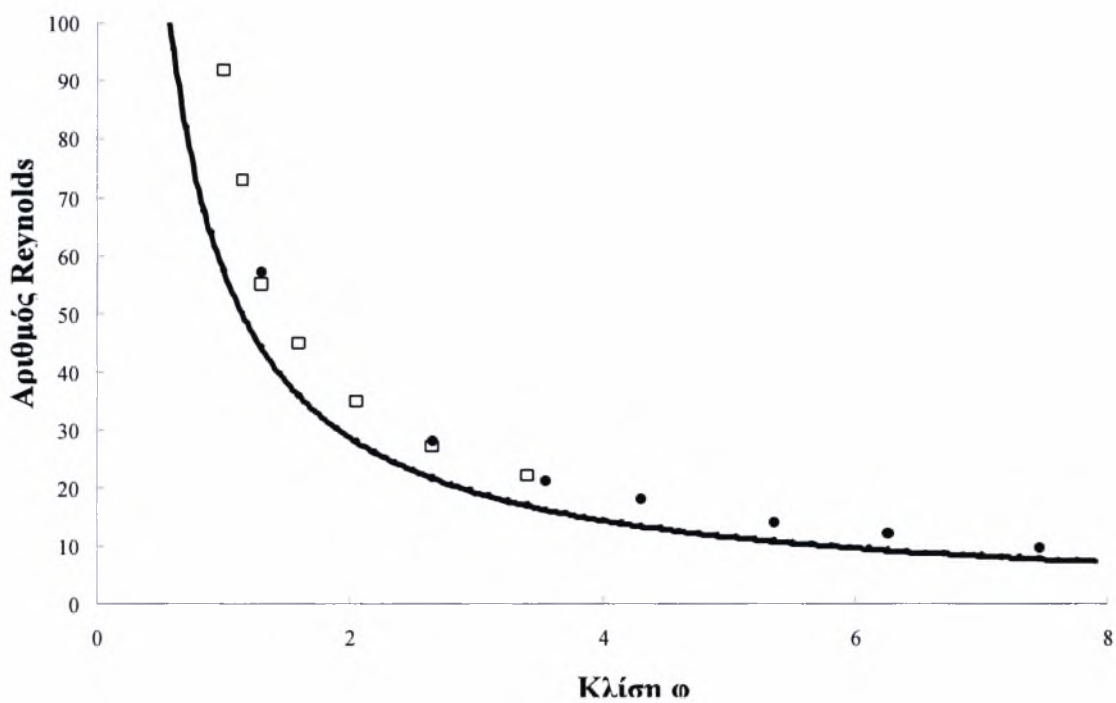


Σχήμα 2.5: Σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων των θεωριών στρωτής και έρπουσας ροής για το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας ($l=0,002m$, $\varphi=60^\circ$).

Τα αποτελέσματα για $Re=0$ και $Re>0$ συμπίπτουν καθώς το $h_N \rightarrow 0$. Τα παραπάνω αποτελέσματα αλλάζουν δραστικά όταν αυξηθεί το πάχος του υμένα (δηλ. με αύξηση του αριθμού Re), και προβλέπεται η ύπαρξη συντονισμού μεταξύ ελεύθερης επιφάνειας και τοιχώματος. Υπολογιστικές προσομοιώσεις για διοδιάστατη μόνιμη ροή κατά μήκος επιφάνειας με μεγάλο πλάτους διαμόρφωσης, έγιναν από τους Trifonov (1998), Malamataris & Bontozoglou (1999) και Bontozoglou (2000). Και σε αυτή την περίπτωση επαληθεύτηκε η εμφάνιση της στατικής μορφής της ελεύθερης επιφάνειας.

2.3.2. Ρευστοδυναμική ευστάθεια

Η γραμμική ευστάθεια της μόνιμης ροής πάνω από κυματοειδές τοίχωμα είναι ένα σημαντικό θέμα που δεν έχει διερευνηθεί συστηματικά. Ο Trifonov (1998) πρόβλεψε υπολογιστικά ότι η ροή υγρού υμένα κατά μήκος ενός κατακόρυφου περιοδικού τοιχώματος γίνεται γραμμικά ασταθής πάνω από έναν πεπερασμένο (αλλά μικρό) αριθμό Re . Υπενθυμίζουμε ότι από την εξίσωση (2.13) το όριο αστάθειας κατακόρυφου επίπεδου τοιχώματος είναι $Re=0$, συνεπώς η παραπάνω υπολογιστική πρόβλεψη αντιστοιχεί σε (μικρή) αύξηση της ευσταθούς περιοχής. Η μόνη πειραματική παρατήρηση δόθηκε από τους Bontozoglou & Vlachogiannis (2002) και αφορά ένα μόνον τοίχωμα με ορθογωνική περιοδικότητα ύψους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2.5 και δείχνουν ότι η περιοδικότητα του τοιχώματος επιδρά σταθεροποιητικά στη ροή και αυξάνει τον κρίσιμο αριθμό Re σε σχέση με αυτόν του επίπεδου τοιχώματος.



Σχήμα 2.6: Καμπύλη ευστάθειας της ροής υγρού υμένα σε διάφορες κλίσεις ως συνάρτηση του αριθμού Re για περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. (□) $Ka=3365$, (*) $Ka=1102$, (—) $Re=5/6\cot\theta$.

Οι Aksel et al. (2003) ανέλυσαν γραμμικά την ψευδομόνιμη προσέγγιση της μόνιμης ροής σε ημιτονοειδές τοίχωμα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η σταθεροποίηση της ροής είναι ισχυρή συνάρτηση του πλάτους των κυματισμών. Παράλληλα, διαπίστωσαν ότι σε κάποιες συνθήκες

μπορεί να εμφανιστεί τοπική αστάθεια στη ροή σε αριθμό Re ακόμα και μικρότερο από τον κρίσιμο για επίπεδο τοίχωμα. Στην περίπτωση αυτή αναπτύσσονται προσωρινά επιφανειακά κύματα τα οποία είναι μικρά συγκρινόμενα με το μήκος της διαμόρφωσης του τοιχώματος αλλά μεγάλα σε σχέση με το πάχος του υμένα.

2.4 Πειράματα

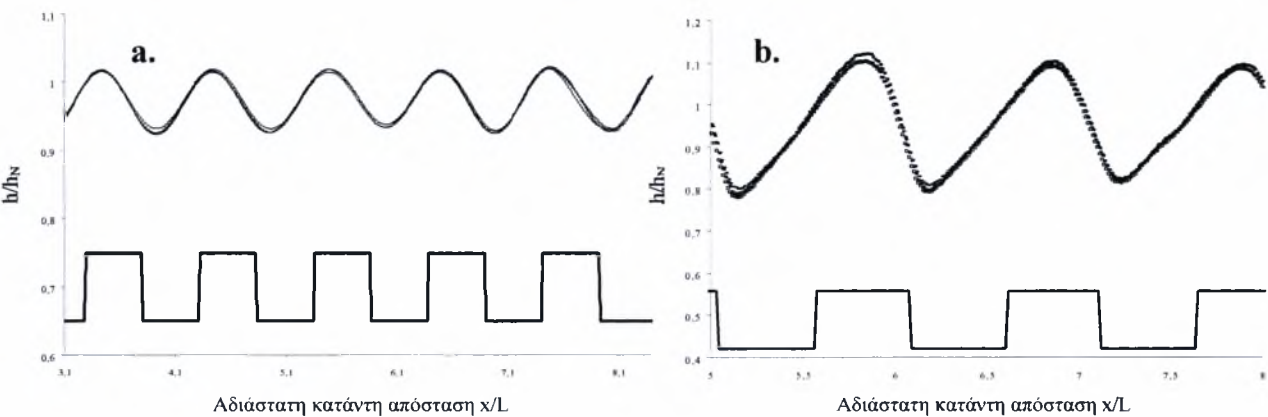
Οι πειραματικές μελέτες πάνω στο πρόβλημα της ροής σε διαμορφωμένο τοίχωμα είναι περιορισμένες. Οι Zhao & Cerro (1992) και Shetty & Cerro (1993) μελέτησαν τέτοιου είδους ροή πάνω από κυματοειδές τοίχωμα σε πολύ χαμηλούς Re . Πιο πρόσφατα, οι Aksel et al. (2003) πιστοποίησαν πειραματικά την εμφάνιση δινών στις κοιλότητες της περιοδικής διαμόρφωσης του τοιχώματος, για έρπουσα ροή. Όπως προαναφέρθηκε, πάνω από έναν κρίσιμο αριθμό Re εμφανίζεται μια περιοχή ανακυκλοφορίας. Το μέγεθος της δίνης αυτής αυξάνεται με την αύξηση του πάχους του υμένα μέχρι να πάρει ασυμπτωτικά μια μέγιστη τιμή για αρκετά μεγάλα πάχη. Συγχρόνως, και η ταχύτητα ανακυκλοφορίας των δινών είναι ανάλογη του πάχους του υμένα. Το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος υμένα για την εμφάνισή τους αυξάνεται με την γωνία κλίσης και μειώνεται με την αύξηση της επιφανειακής τάσης. Παρόλα αυτά η μέγιστη τιμή του μεγέθους της δίνης είναι ανεξάρτητη από τις δύο παραπάνω παραμέτρους. Επίσης, υπάρχει ένα ελάχιστο πλάτος διαμόρφωσης του τοιχώματος του καναλιού κάτω από το οποίο δεν μπορούν να δημιουργηθούν οι δίνες. Το κρίσιμο πάχος υμένα για την εμφάνισή τους μειώνεται όσο αυξάνεται το πλάτος της περιοδικής διαμόρφωσης του τοιχώματος μέχρι που φτάνει την τιμή μηδέν (εμφάνιση περιοχών ανακυκλοφορίας ανεξάρτητα του πάχους του υμένα). Περαιτέρω αύξηση του πλάτους, έχει ως αποτέλεσμα την γένεση μιας δεύτερης δίνης η εμφάνιση της οποίας και πάλι εξαρτάται από το πάχος του υμένα. Η ταχύτητα της δεύτερης δίνης είναι αρκετά μικρότερη από αυτή της πρώτης. Όσον αφορά την ταχύτητα της ροής, είναι αρκετά μικρότερη πάνω από κυματοειδές τοίχωμα από την ταχύτητα της ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα για λεπτά πάχη υμένα. Όσο το πάχος του υμένα αυξάνεται η διαφορά αυτή τείνει να μηδενιστεί. Για αρκετά μεγάλα πάχη υμένα ο λόγος των δύο ταχυτήτων είναι μονάδα.

Πειράματα σε δύο υγρά διαφορετικού ιξώδους έδειξαν ότι η εμφάνιση των δινών είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό Re . Με άλλα λόγια, έχουν το ίδιο μέγεθος για το ίδιο πάχος υμένα ακόμα και αν ο αριθμός Re διαφέρει κατά δύο τάξεις μεγέθους. Ο λόγος της ανεξαρτησίας από τον Re βρίσκεται στο γεγονός ότι οι ταχύτητες στο τοίχωμα μέσα στις κοιλότητες είναι αρκετά μικρότερες από την ταχύτητα στην επιφάνεια. Έτσι, ενώ η μέση ταχύτητα της ελεύθερης

επιφάνειας είναι ίδια με αυτή που έχει η ροή πάνω από επίπεδο κεκλιμένο τοίχωμα στις περιοχές ανακυκλοφορίας ο ταχύτητες δεν αλλάζουν αισθητά.

Για ροή σε πεπερασμένους αριθμούς Re , τα μόνα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάστηκαν από τους Vlachogiannis and Bontozoglou (2002) για ένα τοίχωμα ορθογωνικής διατομής μήκους κύματος 12mm, και πρόσφατα από τους Wienschem & Aksel (2004) για ημιτονοειδές τοίχωμα μήκους κύματος 300mm.

Σύμφωνα με τους Vlachogiannis and Bontozoglou (2002), η εξέλιξη της ροής σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα μπορεί να χωριστεί σε διαφορετικές περιοχές ανάλογα με τον αριθμό Re . Όπως προαναφέρθηκε στο διάγραμμα της ευστάθειας, για $Re \ll O(10^0-10^1)$ η ελεύθερη επιφάνεια είναι επίπεδη. Σε αριθμούς Reynolds $Re \gg O(10^2)$, το πάχος του υμένα αποκλίνει από τη θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt και αναπτύσσεται μια στατική παραμόρφωση στην ελεύθερη επιφάνεια (σχήμα 2.16). Το φαινόμενο αυτό έχει προβλεφθεί θεωρητικά από τους Bontozoglou & Paparolymerou (1997), Trifonov (1998) και Bontozoglou (2000). Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας στη στατική περιοχή είναι πάντοτε περιοδική, με μήκος κύματος ίσο με αυτό της διαμόρφωσης του τοιχώματος. Το πλάτος της διαμόρφωσης αυτής και η διαφορά φάσης μεταξύ τοιχώματος και ελεύθερης επιφάνειας εξαρτώνται από τον αριθμό Re , τη γωνία κλίσης του καναλιού και το ιξώδες του ρευστού.

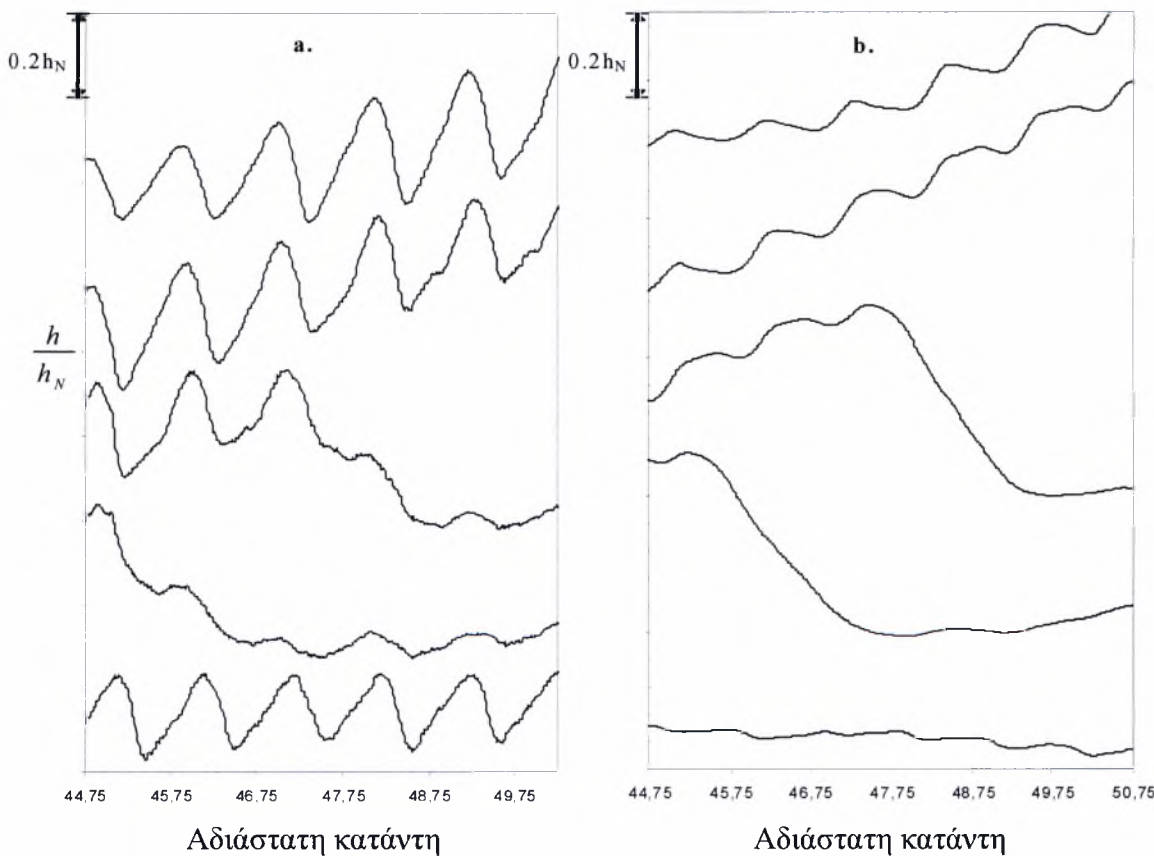


Σχήμα 2.7: Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας σε 4 διαδοχικές χρονικές στιγμές ($\Delta t=0,1\text{sec}$) (a) ημιτονοειδής μορφή και (b) μορφή με περισσότερες αρμονικές.

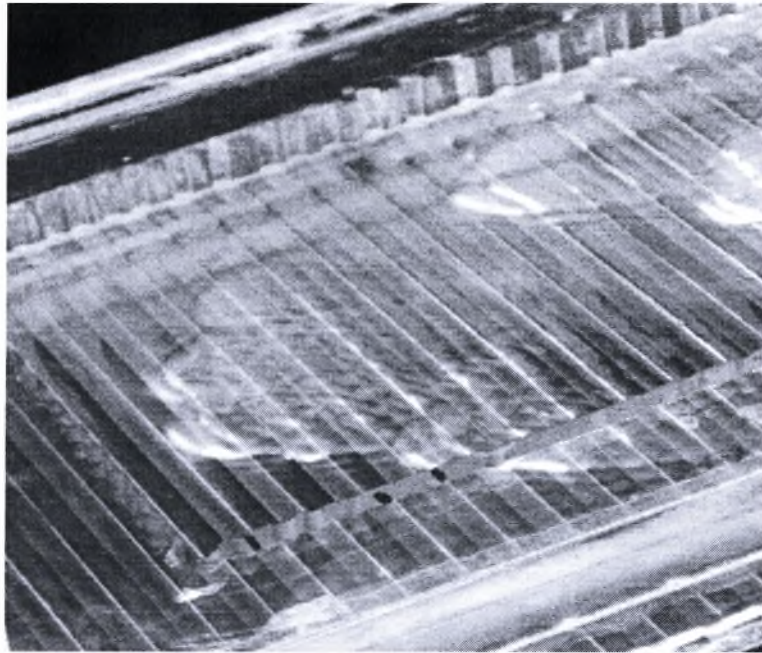
Σε μεγαλύτερους Re , οι Vlachogiannis and Bontozoglou (2002), παρατηρούν ότι η έντονη διέγερση του φυσικού θορύβου αλλά και η αλληλεπίδραση τοιχώματος - ελεύθερης επιφάνειας, επιδρά καταλυτικά στη δημιουργία μοναχικών κυμάτων σε κοντινές αποστάσεις από το σημείο δημιουργίας του υμένα. Τα μοναχικά κύματα υπερθέτονται της βασικής μορφής της επιφάνειας

του υμένα (σχήμα 2.8). Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι εμφανίζονται με σχετικά σταθερή συχνότητα, κάτι το οποίο είναι αποτέλεσμα της επίδρασης του τοιχώματος αφού στις ίδιες συνθήκες αλλά για ροή πάνω από επίπεδο τοίχωμα δεν παρατηρείται κάτι ανάλογο. Με περαιτέρω αύξηση του Re , η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας μετατρέπεται από διδιάστατη σε τρισδιάστατη με τη δημιουργία πεταλοειδών κυμάτων (horse shoe waves – σχήμα 2.9).

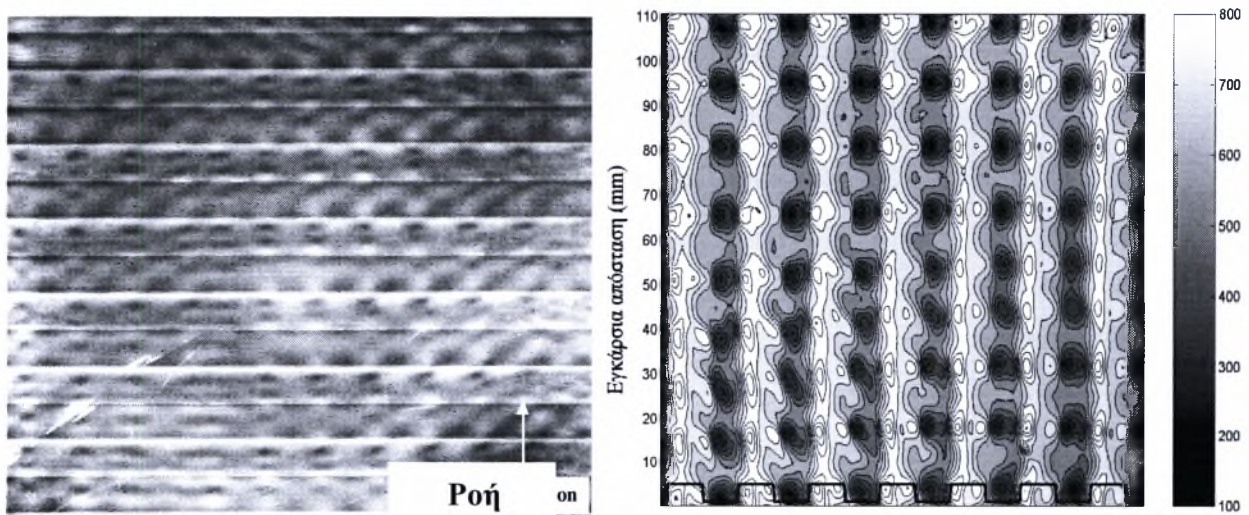
Τέλος, οι Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) παρατήρησαν ότι η μετάβαση σε χαοτική δομή -όπως θα ήταν αναμενόμενο από τα αποτελέσματα της ροής πάνω από επίπεδο τοίχωμα- αναβάλλεται εξαιτίας της εμφάνισης μιας τρισδιάστατης δομής η οποία συνίσταται από εγκάρσιες σειρές από υψώματα και βαθουλώματα (σχήμα 2.10α,β). Η διαμόρφωση των εγκάρσιων αυτών δομών οδηγεί στην σταθεροποίηση της ροής, όπως καταδεικνύεται από: (α) τη μείωση του μέσου πάχους του υμένα, το οποίο πλέον αποκλίνει από την θεωρητική κατά Nusselt λύση, και (β) τη μείωση της έντασης ή ακόμα και την εξάλειψη των οδευόντων κυμάτων.



Σχήμα 2.8: (α) Το πέρασμα ενός πλήρους αναπτυσσόμενου μοναχικού κύματος πάνω από το διαμορφωμένο τοίχωμα. (β) το πέρασμα του ίδιου κύματος χωρίς την επίδραση του τοιχώματος.



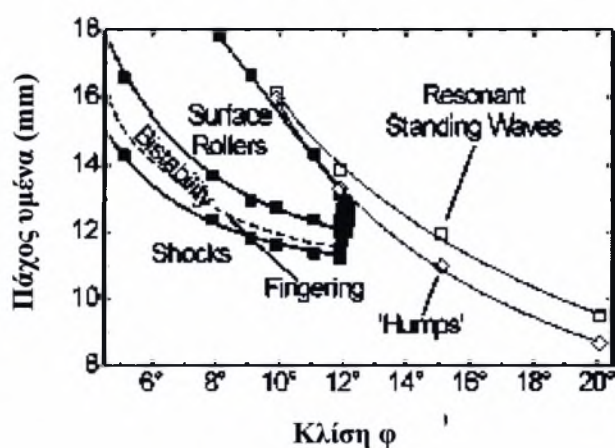
Σχήμα 2.9: Πεταλοειδή κύματα (horse – shoe waves)



Σχήμα 2.10: Η εμφάνιση των εγκάρσιων βαθουλωμάτων στην ελεύθερη επιφάνεια.

Οι Wienschem & Aksel (2004) μελέτησαν τη ροή για αριθμούς Re τάξης 10-100 πάνω από ημιτονοειδές τοίχωμα μεγάλου μήκους κύματος ($L=30\text{cm}$). Οι ερευνητές παρατήρησαν δύο διαφορετικά φαινόμενα, τη δημιουργία υδραυλικού άλματος με απότομο μπροστινό μέρος και την εμφάνιση κυμάτων με δίνες (rolling waves). Μάλιστα, υπάρχει μια περιοχή, η οποία εξαρτάται από τη γωνία κλίσης και την επιφανειακή τάση, όπου εμφανίζονται και οι δύο

παραπάνω δομές. Σε πιο μεγάλα πάχη υμένα τα κύματα με δίνες εξαφανίζονται και εμφανίζεται η στατική δομή συντονισμού, αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης του υμένα με την επιφάνεια. Στην περιοχή μετάβασης από τη μια δομή στην άλλη παρουσιάζεται και το φαινόμενο την περιοδικής εμφάνισης των δύο δομών. Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζεται ένας παραμετρικός χάρτης εμφάνισης των δομών συναρτήσει της γωνίας κλίση και του πάχους του υμένα. Για μικρές γωνίες κλίσης αυξάνοντας το πάχος του υμένα εμφανίζονται υδραυλικά άλματα. Αυξάνοντας ακόμα περισσότερο το πάχος του υμένα, οι δομές αυτές χάνουν την ευστάθειά τους και εμφανίζονται τα κύματα με τις δίνες. Παρατηρούμε στο σχήμα και την περιοχή όπου έχουμε συνύπαρξη των δύο δομών.

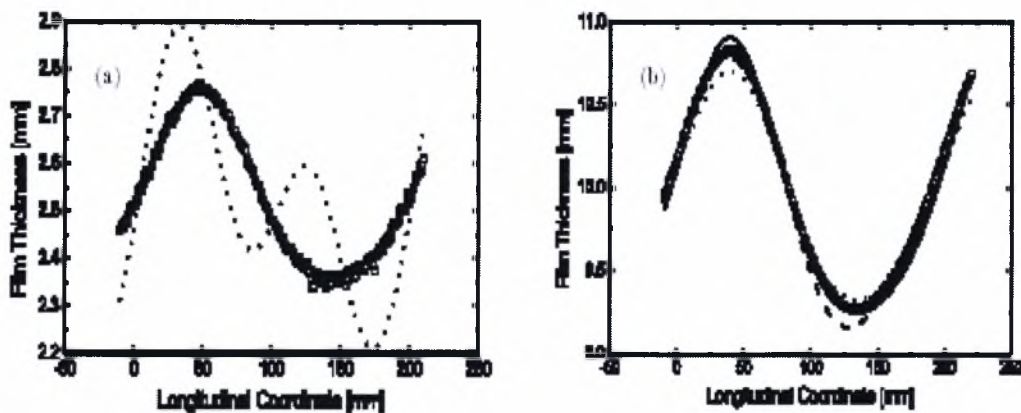


Σχήμα 2.11: Οι διαφορετικές περιοχές ροής πάνω από τοίχωμα μεγάλου πλάτους διαμόρφωσης για χαμηλούς αριθμούς Re κατά Aksel et al.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω εργασιών αποτέλεσαν το έναυσμα για διάφορα ερωτήματα, με κυριότερο την επίδραση του πλάτους της γεωμετρικής διαμόρφωσης στα φαινόμενα που παρατηρούνται. Τονίζεται ότι τα συμπεράσματα των Vlachogiannis & Bontozoglou (2002) και Wienschem & Aksel (2004) βασίζονται σε ένα μόνον τοίχωμα. Επίσης, η μελέτη των χαρακτηριστικών των οδεύοντων κυμάτων αναμένεται να διευκολυνθεί με την εισαγωγή οργανωμένων διαταραχών σταθερής συχνότητας, κάτι που δεν έχει πραγματοποιηθεί ως τώρα.

Οι Wienschem, Schole. Aksel μελέτησαν την επίδραση της διαμορφωμένης επιφάνειας ενός τοιχώματος, στη ροή υγρού υμένα. Συγκεκριμένα προσέγγισαν το παραπάνω πρόβλημα θεωρώντας νευτώνικό ρευστό σε κεκλιμένο ημιτονοειδές τοίχωμα. Το πείραμα περιγράφεται από τον αριθμό Reynolds, τη γωνία κλίσης του τοιχώματος και από τέσσερις ακόμα παραμέτρους: μήκος κύματος, μήκος ημιτονοειδούς τοιχώματος, πάχος υμένα και μήκος τριχοειδών κυμάτων.

Μελετήθηκε η ροή υγρού υμένα σιλικονούχων λαδιών με δυναμικό ιξώδες από 1000 mPas έως 5000 mPas (σχήμα 2.12 a,b). Το πάχος του υμένα μετρήθηκε από τα πλάγια με χρήση CCD κάμερας εφοδιασμένη με μικροσκόπιο. Η κάμερα ήταν συνδεδεμένη με μία XYZ εγκάρσια μονάδα και σκάνανε τον πυθμένα και την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού.

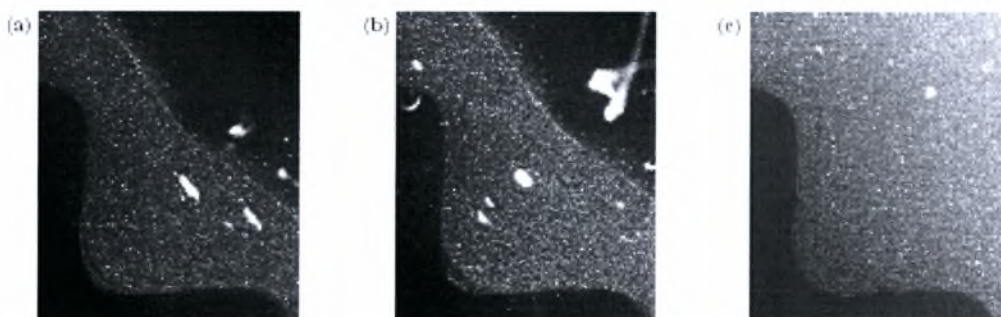


Σχήμα 2.12: Σύγκριση των μετρήσεων του πάχους του υγρού υμένα με τις θεωρητικές προσεγγίσεις. Τα διάσπαρτα τετράγωνα υποδεικνύουν τα σημεία μέτρησης. Τα αποτελέσματα του Wang φαίνονται με τις συμπαγή γραμμή και οι θεωρητικές προσεγγίσεις σαν διάσπαρτη καμπύλη. Το κοίλωμα και η κορυφή του κυματισμού, κυμαίνεται από 0 mm έως 100 mm. Μήκος κύματος 200 mm, πλάτος 4 mm και $Re: 10^{-3}$, a) 10^{-1} , b) γωνία κλίσης 30°

Η έρπουσα ροή σε ασθενή κυματοειδή τοιχώματα περιγράφεται πολύ καλά από τις θεωρητικές προσεγγίσεις. Οι λεπτοί υμένες περιγράφονται άριστα από τις παρατηρήσεις των Wang, Wierschem, Schole. Aksel .

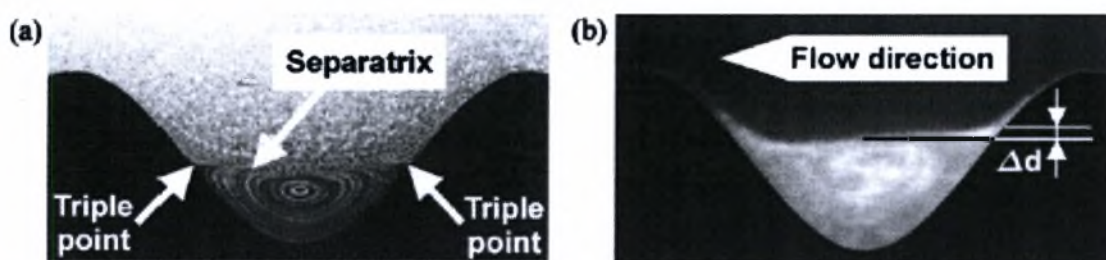
Μία άλλη πτυχή της έρευνας τους έχει να κάνει με την οπτικοποίηση της ροής του υγρού υμένα. Το σχήμα 2.10 δείχνει μία σειρά από εικόνες της ροής υγρού υμένα σε ημιτονοειδή τοίχωμα με μήκος κύματος 5 mm και πλάτους 1 mm. Μιας και στην εικόνα 2.13a δεν είναι δυνατή η παρατήρηση των ζωνών ανακυκλοφορίας , μία μικρή αύξηση στο πάχος του υμένα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της πρώτης δίνης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.13b. Η δίνη έχει μέγεθος 100 μm περίπου. Αύξηση του πάχους του υμένα οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους των σχηματιζόμενων δινών (εικόνα 2.13c). Γενικά μέχρι έναν κρίσιμο αριθμό Re , δεν υπάρχουν δίνες στο τοίχωμα. Πέρα από αυτό τον αριθμό το μέγεθος των δινών είναι ισχυρή συνάρτηση του συγκεκριμένου αριθμού.

Συμπερασματικά, βρέθηκε ότι κάτω από καθεστώς στρωτής ροής, το μέγεθος των σχηματιζόμενων ζωνών ανακυκλοφορίας αυξάνεται συναρτήσει του αριθμού Froude. Η αδράνεια λόγω των επιφανειακών κυμάτων, επιφέρει παραμόρφωση και διάλυση της δίνης. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ροή μάζας και συγκεκριμένα σε ανταλλαγή υλικού μεταξύ των δινών και του υπερκείμενου υμένα. Υπάρχουν δύο μηχανισμοί με τους οποίους γίνεται η ανταλλαγή υλικού: α) μία έλικα εισροής και εκροής στο κέντρο της δίνης και β) μία ακτινική κίνηση σωματιδίων διάφορων από την κύρια ροή του ρευστού.

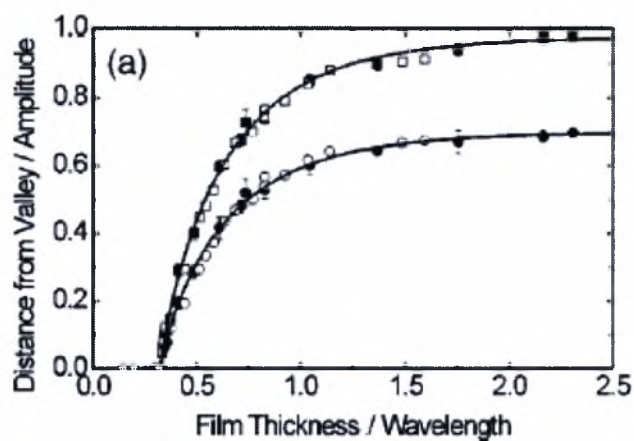


Σχήμα 2.13: Ροή υγρού υμένα όπως οπτικοποιήθηκε , με την παράταξη διακριτών εικόνων. Το κυματοειδές τοίχωμα είναι στο αριστερό κάτω μέρος, ενώ ο υμένας διακρίνεται στην περιοχή με τα πολλά στίγματα. Η ελεύθερη επιφάνεια απεικονίζεται ως η λεπτή φωτεινή γραμμή . Κάποια ίχνη πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια , οφείλονται στην αντανάκλαση του εκπεμπόμενου φωτός από την ελεύθερη επιφάνεια. Στην εικόνα 1a δεν μπορεί να παρατηρηθεί κάποια ζώνη ανακυκλοφορίας. Στην εικόνα 1b φαίνεται η γέννηση μίας μικρής δίνης. Στην 1c φαίνεται ξεκάθαρα η δίνη

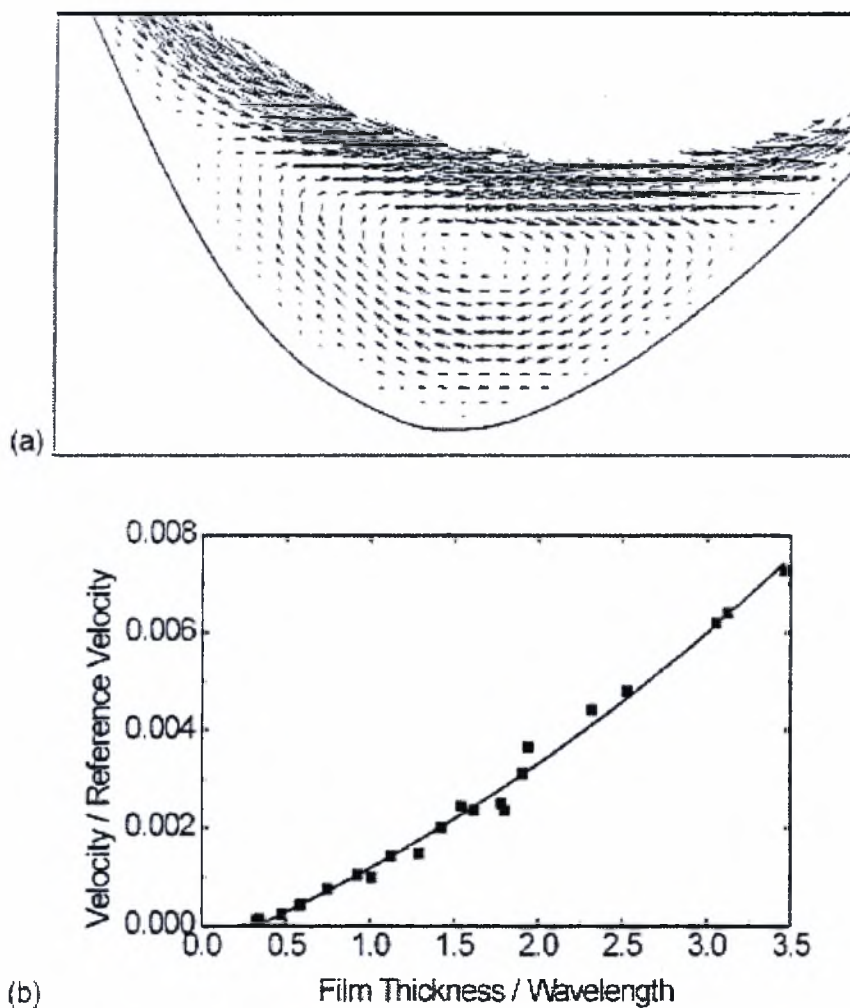
Τέλος πρέπει να γίνει αναφορά στην ταχύτητα της ροής του υγρού υμένα σε ένα περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Κλειδί σε αυτό το σημείο είναι η κατανόηση του γεγονότος ότι το κύριο αίτιο για τη δημιουργία των στροβιλισμών είναι η γωνία κλίσης του τοιχώματος. Σε μικρούς αριθμούς Reynolds που κυμαίνονται από $3 \cdot 10^{-5}$ έως 1,2 φαινομενικά ο αριθμός Reynolds δεν διαδραματίζει κανένα ρόλο στην ανάπτυξη των ζωνών ανακυκλοφορίας. Όπως δείχνει το σχήμα 2.15, ο στροβιλισμός έχει το ίδιο μέγεθος με το μέγεθος του υμένα άσχετα από την τιμή του αριθμού Reynolds.



Σχήμα 2.14: Ζώνες ανακυκλοφορίας στον πυθμένα του τοιχώματος. Η κύρια ροή του ρευστού είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά. Η εικόνα (a) δείχνει τη σχηματιζόμενη δίνη στο μέγιστο μέγεθός της, παρατηρηθείσα σε μικρό αριθμό Reynolds. Η (b) δείχνει τη ζώνη ανακυκλοφορίας του υλικού B200 silicone oil σε πάχος υγρού υμένα 14,2 mm. Η ανύψωση της δίνης στο αντίθετο προς τη ροή τρισδιάστατο σημείο συμβολίζεται με Δd και φαίνεται στην εικόνα b, με γωνία κλίσης 45° και αριθμό Reynolds: 0.2 (a), 228 (b)



Σχήμα 2.15 Μέγεθος των δινών συναρτήσει του πάχους του υμένα.



Σχήμα 2.16 Πεδίο ταχυτήτων των ζωνών ανακυκλοφορίας στο αυλάκι του πυθμένα (a) μέγιστη ταχύτητα ανακυκλοφορίας συναρτήσει του πάχους του υμένα (b)

Η κύρια υπόθεση για τη μη εξάρτηση των ζωνών ανακυκλοφορίας από τον αριθμό Reynolds έγκειται στο γεγονός ότι η ταχύτητα στον πυθμένα του διαμορφωμένου τοιχώματος είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια. Η ταχύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια είναι όμοια με την ταχύτητα στο επίπεδο τοίχωμα. Η ταχύτητα ανακυκλοφορίας όπως δείχνει το σχήμα 2.16 είναι τρεις με τέσσερις τάξεις μικρότερη από αυτή στην ελεύθερη επιφάνεια.

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διαδικασία

Στο παρών κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων. Αρχικά παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και οι όποιες τροποποιήσεις έγιναν σε αυτή με σκοπό την καλύτερη δυνατή πραγματοποίηση των πειραμάτων. Παρουσιάζεται το σύστημα εφαρμογής εξωτερικής διαταραχής καθώς επίσης και η μέθοδος της αγωγιμομετρικής τεχνικής. Τέλος γίνεται αναλυτική περιγραφή της εκτέλεσης και επεξεργασίας των πειραμάτων στις διάφορες συνθήκες ροής.

3.1 Πειραματική συσκευή

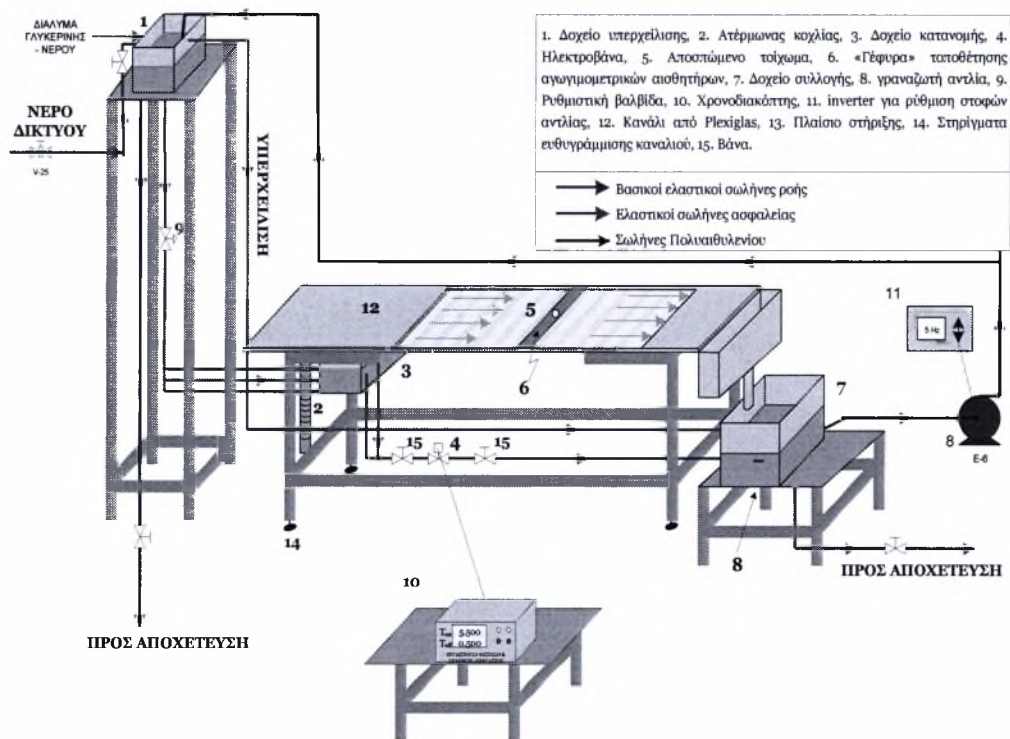
3.1.1 Το αρχικό πρότυπο

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε βρίσκεται στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Συγκεκριμένα είναι μία συσκευή, κατασκευασμένη από το πολυμερές υλικό Plexiglas, η οποία επιτρέπει τη ροή μίας ευρείας γκάμας ρευστών σε διάφορες επιβαλλόμενες συνθήκες. Το πλάτος του καναλιού είναι 25 cm και το μήκος του 128 cm. Στηρίζεται πάνω σε σιδερένια βάση η οποία δίνει τη δυνατότητα ευθυγράμμισης του καναλιού. Σε ύψος από το έδαφος, βρίσκεται η δεξαμενή υπερχειλίσας που είναι συνδεδεμένη με την παροχή νερού. Στη δεξαμενή βρίσκονται δύο σωληνώσεις που οδηγούν στην αποχέτευση για την αποφυγή φαινομένων διαρροής. Στην έξοδο της δεξαμενής είναι τοποθετημένη βαλβίδα για τη ρύθμιση της ροής του ρευστού. Στην έξοδο της ρυθμιστικής βαλβίδας έχει κατασκευαστεί σύστημα τριοδικής κατεύθυνσης του ρευστού λειτουργίας με απαρτιζόμενο από ακροφύσια. Με λάστιχο μικρής διαμέτρου Φ8το ρευστό κατευθύνεται από τα ακροφύσια προς το δοχείο κατανομής. Στο τέλος του καναλιού υπάρχει μία ακόμα δεξαμενή όπου συγκεντρώνεται το εκάστοτε ρευστό λειτουργίας καθώς διαπεράσει το κανάλι. Η δεξαμενή αυτή οδηγεί στην

εκάστοτε ρευστό λειτουργίας καθώς διαπεράσει το κανάλι. Η δεξαμενή αυτή οδηγεί στην αποχέτευση αλλά παρέχει και τη δυνατότητα ανακυκλοφορίας του ρευστού με τη βοήθεια εμβαπτιζόμενης αντλίας.

Το κανάλι είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η αλλαγή πλακών που καθορίζουν το είδος του τοιχώματος. Οι διαστάσεις των εν λόγω πλακών είναι 25 cm πλάτος και 50 cm μήκος. Επιπλέον με τη βοήθεια ενός ατέρμονα κοχλία είναι δυνατή η δημιουργία ως και 67° γωνίας κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Τέλος το κανάλι, διαθέτει σύστημα επιβολής εξωτερικής διαταραχής με χρήση ηλεκτροβάνας. Η συγκεκριμένη ηλεκτροβάνα είναι εφοδιασμένη με σύστημα αυτομάτου ελέγχου ώστε να υπάρχει μέγιστη ακρίβεια στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο παραμένει ανοιχτή και κλειστή αντίστοιχα.



Σχήμα 3.1 πειραματική διάταξη

3.1.2 Η τροποποίηση

Για την εκτέλεση των πειραμάτων της παρούσας εργασίας ήταν αναγκαία η τροποποίηση της συσκευής. Συγκεκριμένα, αφού στόχος της εργασίας ήταν η επίδραση του πλάτους του καναλιού στην ευστάθεια του υμένα, έπρεπε να μειωθεί το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας. Η μελέτη της επίδρασης του πλάτους έγινε σε δύο διαφορετικές τιμές πλάτους. Ειδικότερα, η πρώτη σειρά των μετρήσεων έλαβε χώρα σε πλάτος ίσο με τα $2/3$ του αρχικού πλάτους και η δεύτερη σε πλάτος ίσο με το $1/3$ του αρχικού πλάτους του καναλιού. Για τη μείωση του πλάτους χρησιμοποιήθηκαν δύο κομμάτια γυαλιού μήκους 50 cm και πλάτους ίσου με το $1/3$ του αρχικού πλάτους του καναλιού για την πρώτη σειρά μετρήσεων και $2/3$ του αρχικού πλάτους του καναλιού για τη δεύτερη σειρά μετρήσεων. Τα κομμάτια αυτά κολλήθηκαν προσεκτικά πάνω στην επίπεδη πλάκα με χρήση σιλικόνης.

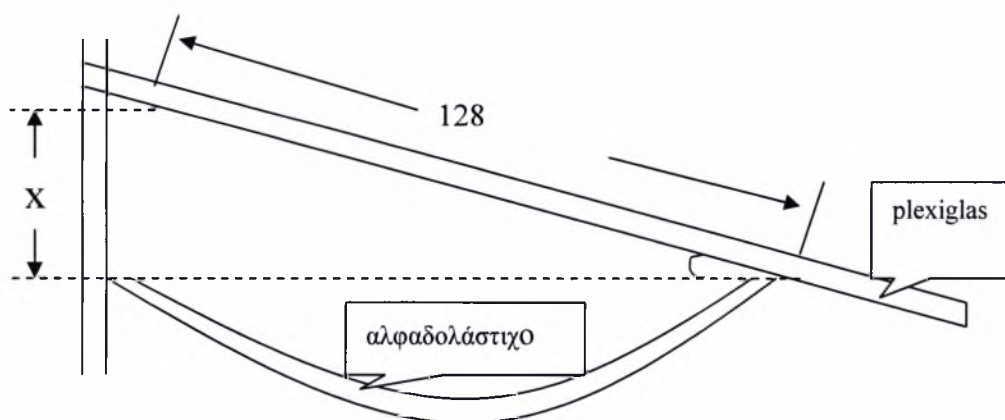
Μία ακόμα συμπληρωματική και ουσιαστική τροποποίηση ήταν η τοποθέτηση εξωτερικής αντλίας. Η χρήση της ήδη υπάρχουσας εμβαπτιζόμενης αντλίας κρινόταν αναποτελεσματική σε μετρήσεις με πυκνά διαλύματα οπότε ήταν αναγκαία η χρήση εξωτερικής αντλίας. Για την αποφυγή εμφάνισης ανισόπεδων θερμοκρασιακών κατανομών επιλέχθηκε γριναζωτή αντλία της οποίας οι στροφές ρυθμιζόταν από τον inverter. Για το σκοπό αυτό ανοίχτηκε οπή στο δοχείο συλλογής ώστε να συνδεθεί η γριναζωτή αντλία με το ρευστό λειτουργίας και στη συνέχεια το ρευστό οδηγήθηκε σε τριοδική έξοδο ανάλογη αυτής του αρχικού προτύπου.

Για μία ειδική κατηγορία πειραμάτων κρίθηκε αναγκαία η αντικατάσταση της ηλεκτροβάνας από έναν σερβο-μηχανισμό. Για το σκοπό αυτό στο κάτω μέρος της βάσης στήριξης ανοίχτηκαν οπές για να συγκρατηθεί ο μηχανισμός και να μπορέσει να συνδεθεί με το ρευστό λειτουργίας με χρήση λάστιχου μικρής διαμέτρου.

3.2. Χειρισμός της πειραματικής συσκευής

3.2.1. Ρύθμιση της γωνίας κλίσης

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η σιδερένια βάση του καναλιού μπορεί να τεθεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος κλίσης το οποίο κυμαίνεται από 0° έως 67° . Με δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη κίνηση του ατέρμονα κοχλία κατέστη δυνατή η επίτευξη της επιθυμητής κλίσης. Για τον έλεγχο της κλίσης, έγινε χρήση του αλφαδολάστιχου.



Σχήμα3.2 καθορισμός της γωνίας κλίσης με αλφαδολάστιχο

Με το ένα άκρο του αλφαδολάστιχου στερεωμένο στο κάτω μέρος του καναλιού και το άλλο στην αρχή της διάταξης , δεμένο πάνω σε βαθμονομημένο γνώμονα κατέστη δυνατή η μέτρηση της κλίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Από τη σχέση:

$\text{εφ}\phi = \frac{x-9.5}{128}$ μπορούσαμε σε οποιαδήποτε θέση να πάρουμε μέτρηση της κλίσης

128

όπου x : μέτρηση στο χάρακα βασισμένη στη στάθμη του αλφαδολάστιχου

9.5: set- off (σημείο έναρξης)

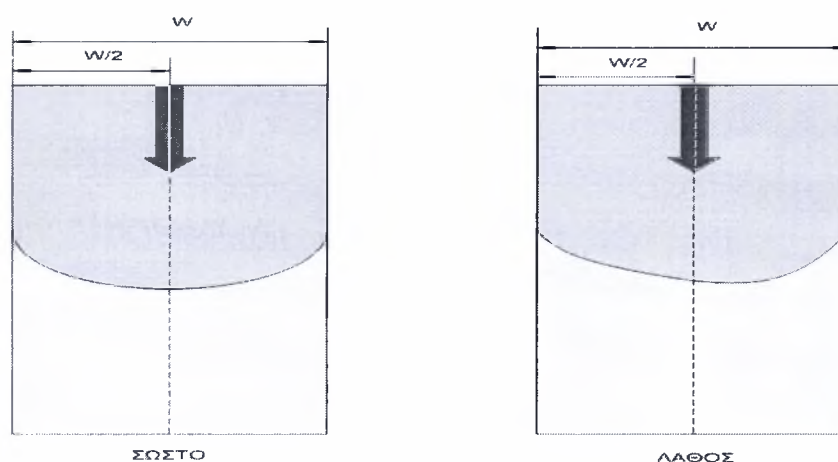
128: μήκος καναλιού

3.2.2. Ευθυγράμμιση του καναλιού

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στη ροή υγρού υμένα σε κεκλιμένο κανάλι είναι η ευθυγράμμιση του καναλιού. Για το σκοπό αυτό έχουν τοποθετηθεί στο πλαίσιο που στηρίζεται το κανάλι κατάλληλα περιστρεφόμενα στηρίγματα (14), τα οποία δίνουν τη δυνατότητα μετακίνησης ολόκληρου του συστήματος προς τα πάνω ή προς τα κάτω.

Προκειμένου να ρυθμιστεί και να ελεγχθεί η ευθυγράμμιση του καναλιού ακολουθείται η εξής διαδικασία: Ρυθμίζεται η παροχή του ρευστού ώστε ο υμένας στο κανάλι να είναι σταθερός χωρίς την ύπαρξη εξωτερικής διαταραχής. Η περίοδος του χρονοδιακόπτη και το μέγεθος της παραγόμενης διαταραχής καθορίζονται σε μέτριο μέγεθος. Χαρακτηριστικές τιμές είναι περίπου 5 s ανοικτή και 0.5 s κλειστή η ηλεκτροβαλβίδα, ενώ ρυθμίζεται και η βάνα που βρίσκεται με την

ηλεκτροβαλβίδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εκτίμηση του μεγέθους της διαταραχής στο σημείο αυτό είναι ποιοτική. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται πάνω στο τοίχωμα ένα μέτωπο της υγρής φάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Σωστή ευθυγράμμιση συνεπάγεται ότι η κορυφή του μετώπου θα βρίσκεται στο κέντρο του τοιχώματος. Σε αντίθετη περίπτωση ρυθμίζονται ανάλογα τα στηρίγματα. Δηλαδή στην περίπτωση, όπως αυτή του σχήματος 3.3, όπου το μέτωπο είναι μετατοπισμένο προς τα δεξιά, δηλώνει ότι περισσότερη μάζα ρευστού βρίσκεται στην πλευρά αυτή οπότε το σημείο αυτό είναι πιο ψηλά από το αντίστοιχο σημείο της αριστερής πλευράς και πρέπει είτε να ανυψωθεί το σημείο αυτό ή να μειωθεί το ύψος από την αριστερή πλευρά. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται μέχρι η κορυφή του κύματος να βρίσκεται στο κέντρο του τοιχώματος σε όλο το μήκος της πλάκας.



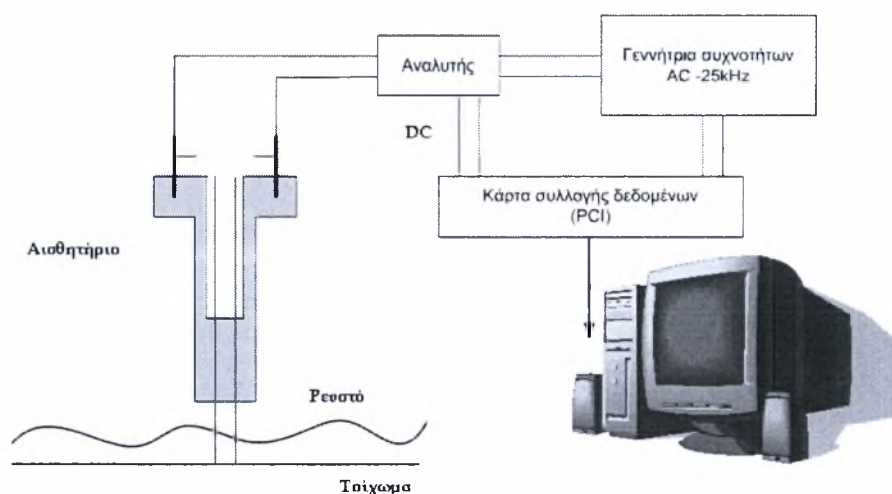
Σχήμα 3.3 Ευθυγραμμισμένο και μη ευθυγραμμισμένο κανάλι

Για να γίνει πιο εύκολα αντιληπτό το μέτωπο του κύματος το ρευστό χρωματίζεται. Συγκεκριμένα, προστίθεται μικρή ποσότητα κατάλληλης χρωστικής ουσίας (ουρανίνη-sodium salt of fluorescein), η οποία έχει την ιδιότητα να φθορίζει κάτω από την επίδραση υπεριώδους φωτός εκπέμποντας ορατό πράσινο-κίτρινο φως σε κεντρικό μήκος κύματος 525-580 nm. Η ουσία αυτή έχει βρεθεί ότι δεν επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών που χρησιμοποιούνται στην εργασία.

Λόγω της ευαισθησίας του συγκεκριμένου συστήματος στήριξης του καναλιού και της έντονης επίδρασης της κακής ευθυγράμμισης στις πειραματικές μετρήσεις η ευθυγράμμιση του ελεγχόταν στην αρχή κάθε μέτρησης, μετά την αλλαγή κλίσης του καναλιού.

3.3 Αγωγιμομετρική τεχνική

Η αγωγιμομετρική τεχνική [Andritsos, 1986] χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας και των διακυμάνσεων της. Η τεχνική στηρίζεται στο γεγονός ότι η αγωγιμότητα μεταξύ δύο παράλληλων μεταλλικών συρμάτων εξαρτάται από το ύψος του υγρού που βρίσκεται ανάμεσα τους. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται το μετρητικό που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της τεχνικής. Το μετρητικό τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz) ώστε να αποφευχθεί η ηλεκτρόλυση του νερού. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών μεταλλικών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή και στη συνέχεια με τη βοήθεια κατάλληλης κάρτας συλλογής δεδομένων (Advantech PCI-1710HG, 16-bit) και προγράμματος που δημιουργήθηκε στο Εργαστήριο σε LabView αποθηκεύεται το εξερχόμενο από το μετρητικό σήμα (τάση DC ως προς χρόνο). Το αισθητήριο είναι κατασκευασμένο από Ertalon, ένα υλικό που επεξεργάζεται εύκολα και παρουσιάζει ικανοποιητική θερμική αντοχή, ενώ το σύρμα ήταν από χρωμονικέλιο διαμέτρου 0.4-0.5 mm. Για την τοποθέτηση των μετρητικών χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες γέφυρες, οι οποίες τοποθετήθηκαν πάνω από το τοίχωμα σε 2 διαφορετικές θέσεις (στην αρχή, και στο τέλος). Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα της κατακόρυφης μετακίνησης του μετρητικού ώστε να τοποθετείται πολύ κοντά στο τοίχωμα. Για την ταυτόχρονη λήψη και από τις δυο θέσεις χρησιμοποιήθηκαν ένας αναλυτής (κάθε αναλυτής έχει δύο κανάλια εισόδου). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, βρέθηκε από πειράματα ότι η μέθοδος αυτή λειτουργεί ικανοποιητικά για τις περιπτώσεις όπου η αγωγιμότητα του ρευστού κυμαινόταν μεταξύ 300-1000 μS .



Σχήμα 3.4. Διάγραμμα συλλογής δεδομένων της αγωγιμομετρικής τεχνικής

3.4 Σύστημα δημιουργίας εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής

Το διαθέσιμο μήκος του καναλιού περιορίζει τη μελέτη της εξέλιξης των φυσικά δημιουργούμενων διαταραχών. Η επιβολή εξωτερικής διαταραχής συγκεκριμένης συχνότητας δίνει τη δυνατότητα μετάβασης σε μια περιοχή ροής στην οποία θα εξελισσόταν η ροή υγρού υμένα σε ένα κανάλι μεγαλύτερου μήκους υπό την επίδραση μόνο του φυσικού θορύβου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα by-pass με ηλεκτροβαλβίδα (4). Η διαταραχή δημιουργείται με τη βοήθεια μιας χρονιζόμενης ηλεκτρο- βαλβίδας (ON/OFF). Για το σκοπό αυτό ενώθηκε το δοχείο συλλογής, μέσω ενός ελαστικού σωλήνα, με το δοχείο κατανομής (Σχήμα 3.2). Μέσω της παράκαμψης αυτής ένα μέρος από το υγρό που βρίσκεται στο δοχείο κατανομής οδηγείται στο δοχείο συλλογής χωρίς να περάσει από την κεκλιμένη πλάκα του καναλιού. Στην παράκαμψη αυτή παρεμβάλλεται η ηλεκτροβαλβίδα. Ένας χρονοδιακόπτης ρυθμίζει το άνοιγμα και το κλείσιμο της ηλεκτροβαλβίδας. Όταν η ηλεκτροβαλβίδα είναι ανοιχτή μια ποσότητα υγρού περνάει άμεσα προς το δοχείο συλλογής. Όταν όμως είναι κλειστή, η ποσότητα αυτή του υγρού οδηγείται μέσω της κεκλιμένης πλάκας στο δοχείο συλλογής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εξωτερικά επιβαλλόμενη αυξομείωση του πάχους του υμένα με το χρόνο (κύμα στην αρχή του καναλιού). Δηλαδή, το περιοδικό φράξιμο της παράκαμψης αυτής προκαλεί διαταραχή στην είσοδο του καναλιού με μορφή υδραυλικού άλματος. Το υδραυλικό αυτό άλμα διαχωρίζεται κατάντη της ροής εξαιτίας των μη-γραμμικών αλληλεπιδράσεων και δημιουργεί μια σειρά μοναχικών κυμάτων. Το μέγεθος της παραγόμενης διαταραχής μπορεί να ρυθμιστεί από τον λόγο των χρονικών διαστημάτων που η διοδος μένει ανοιχτή και κλειστή και από την ποσότητα του ρευστού που επιτρέπεται να περνάει διαμέσου του bypass. Η ποσότητα αυτή ρυθμίζεται από τις βάνες (15) που βρίσκονται εκατέρωθεν της ηλεκτροβαλβίδας. Επίσης, ρυθμίζοντας τον συνολικό χρόνο του φαινομένου, μπορούμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα της διαταραχής. Το σύστημα διαταραχής που περιγράφηκε μπορεί να παράγει συχνότητες διαταραχής από 0.1 Hz έως και 5 Hz.



Σχήμα 3.5 Σύστημα διαταραχής

3.5 Ιδιότητες ρευστών

Ανάλογα με την κλίση επιλέγεται το κατάλληλο ρευστό για τα πειράματα και εισάγεται στο δοχείο συλλογής. Συγκεκριμένα, για τις 5° χρησιμοποιήθηκε διάλυμα νερού - γλυκερίνης με 30% γλυκερίνη, ενώ για τις 7°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30° χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα 40%, 56%, 66%, 73%, 76% και 80% αντίστοιχα.

Αύξηση του ιξώδους του ρευστού έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της ανάπτυξης των δομών και της εξαφάνισης των τρισδιάστατων ασταθειών ακόμα και σε σχετικά μεγάλες γωνίες και αριθμούς Re. Βέβαια η προσθήκη μεγάλου ποσοστού γλυκερίνης θα είχε ως αποτέλεσμα την πολύ αργή εξέλιξη των φαινομένων και σ' αυτή την περίπτωση το μήκος του καναλιού δεν θα ήταν αρκετό για να αναπτυχθούν πλήρως. Οπότε, η επιλογή του ρευστού πρέπει να είναι προσεκτική ώστε να μην εξαχθούν εσφαλμένα συμπεράσματα για την εξέλιξη της ροής. Ο προσδιορισμός της σύστασης και της πυκνότητας του εκάστοτε διαλύματος έγινε μετρώντας στην αρχή και στο τέλος κάθε πειράματος τον δείκτη διάθλασης του διαλύματος με τη βοήθεια του διαθλασίμετρου (**Abbe 5 Refractometer - Bellingham+Stanley Ltd.**). Σε καμία μέτρηση δεν παρουσιάστηκε μεταβολή του δείκτη διάθλασης.

Στη συνέχεια, ανατρέχοντας στους πίνακες ιδιοτήτων των διαλυμάτων γλυκερίνης - νερού για τη θερμοκρασία των 20° C (Παράρτημα), υπολογιζόταν η τελική σύσταση του μίγματος και στη συνέχεια το κινηματικό ιξώδες χρησιμοποιώντας πάλι τους πίνακες του παραρτήματος με δεδομένη θερμοκρασία 20° C και σύσταση μίγματος αυτήν που προσδιορίστηκε με την προηγούμενη διαδικασία.

Βρέθηκε ότι η πειραματική τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί λειτουργεί για την περίπτωση που η αγωγιμότητα του ρευστού είναι μεταξύ 300-1000 μS . Εξαιτίας του γεγονότος ότι η γλυκερίνη δεν είναι ιδιαίτερα αγωγίμη υπήρχαν περιπτώσεις όπου ήταν απαραίτητη η αύξηση της αγωγιμότητας των διαλυμάτων νερού-γλυκερίνη. Αυτό επιτυγχανόταν με την προσθήκη μικρής ποσότητας αλατιού στο διάλυμα.

Η μέτρηση της αγωγιμότητας γινόταν χρησιμοποιώντας ένα αγωγιμόμετρο (Consort C834). Για το σκοπό αυτό λαμβανόταν δείγμα από το κανάλι αρκετές φορές κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται από τη χρήση της γλυκερίνης είναι ο εγκλωβισμός αέρα μέσα στο διάλυμα και η δημιουργία φυσαλίδων οι οποίες επηρεάζουν τη ροή. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται τόσο κατά την ανάμειξη των δυο συστατικών όσο και κατά τη διάρκεια του πειράματος, στα σημεία της συσκευής που υπάρχει έντονη τυρβώδη ροή. Στην πρώτη περίπτωση

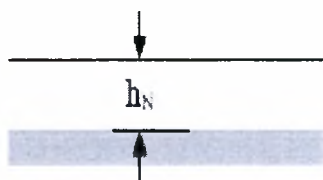
οι φυσαλίδες εξαφανίζονται με την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος (20 με 30 λεπτά) έπειτα από την καλή ανάμειξη των συστατικών και τη σταθεροποίηση της ροή. Η δεύτερη περίπτωση αντιμετωπίζεται ομαλοποιώντας τη ροή σε όλα τα σημεία της συσκευής, π.χ. κατά την άντληση του ρευστού από το δοχείο συλλογής στο δοχείο υπερχείλισης, να μην πέφτει το ρευστό από ύψος στην ελεύθερη επιφάνεια.

Το πρόβλημα της μη καλής διαβροχής της επιφάνειας του καναλιού από το υγρό, το οποίο είναι δυνατό να παρουσιαστεί σε μεγάλες κλίσεις και μικρούς αριθμούς Re , αντιμετωπίζεται με την επάλειψη του καναλιού με το κολλώδες υλικό Sodium Silicate, το οποίο βρέθηκε ότι επηρεάζει ελάχιστα την αγωγιμότητα των ρευστών (προκαλεί μικρή αύξηση). Τέλος για τον καθαρισμό της συσκευής χρησιμοποιείται υπεροξείδιο του υδρογόνου (Peridrol). Οι δύο τελευταίες ουσίες δεν επηρεάζουν τα μέρη της διάταξης.

3.6 Εκτέλεση του πειράματος

3.6.1 Βαθμονόμηση αγωγιμομετρικής τεχνικής

Κατά την έναρξη κάθε πειραματικής μέτρησης ήταν απαραίτητη η βαθμονόμηση της αγωγιμομετρικής τεχνικής. το σήμα που αποθηκεύεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι η μεταβολή της τάσης ως προς το χρόνο. Προκειμένου να μετατραπεί η τάση σε πάχος υμένα είναι απαραίτητο να γίνουν κάποια πειράματα σε τέτοιες συνθήκες όπου το πάχος του υμένα να είναι γνωστό. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η θεωρητική πρόβλεψη κατά Nusselt, η οποία προβλέπει το πάχος του υμένα για την περίπτωση που ο υμένας είναι ευσταθής.



Σχήμα 3.6. Πάχος υγρού υμένα κατά Nusselt για επίπεδο τοίχωμα.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης ήταν η εξής : βάσει της γωνίας κλίσης του τοιχώματος υπολογιζόταν ο κρίσιμος αριθμός Reynolds για επίπεδο τοίχωμα από την εξίσωση :

$Re = Re_{crit} = \frac{5}{6} \cot \phi$ για διαφορες παροχές του ρευστού (Q_0 , kg/s) καταγραφόταν το σήμα (Volt)

για περίπου 30 s με ρυθμό δειγματοληψίας 100 Hz σε κάθε μετρητικό. Η επιλογή των παροχών καθοριζόταν από τον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Γενικά γινόταν προσπάθεια, οι παροχές που θα γινόταν η βαθμονόμηση να ήταν όσο το δυνατόν πιο κοντά στον κρίσιμο αριθμό Reynolds. Από την παροχή υπολογιζόταν ο αριθμός Reynolds και το πάχος υμένα Nusselt από τις εξισώσεις :

$$Re = \frac{Q_0}{w \cdot \rho \cdot v} \quad (3-1)$$

$$h_N = 10^6 \cdot \left(\frac{3 \cdot Re \cdot v^2}{g \cdot \sin.} \right)^{1/3} \quad (3-2)$$

όπου w το πλάτος του καναλιού και h_N το πάχος του υμένα σε μm . Από τις τιμές τάσης και το πάχος του υμένα με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν οι γραμμικές σχέσεις που δίνουν την εξάρτηση του πάχους από την τάση και είναι της μορφής :

$$h_i = A \cdot V_i + B \quad (3-3)$$

όπου A και B σταθερές και ο δείκτης i αντιστοιχεί στα μετρητικά. Με την βοήθεια της εξίσωσης αυτής οποιαδήποτε τάση μπορεί να εκφραστεί σε πάχος υμένα.

3.6.2 Αναλυτική περιγραφή των πειραμάτων

Τα πειράματα που επιλέχθηκαν να γίνουν στα πλαίσια της εργασίας αφορούσαν μετρήσεις τόσο στο επίπεδο τοίχωμα όσο και σε περιοδικά διαμορφωμένα τοιχώματα. Στην πλειοψηφία των πειραματικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε εξωτερικά επιβαλλόμενη διαταραχή μορφής κατακόρυφου υδραυλικού άλματος ενώ σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε εξωτερικά επιβαλλόμενη ημιτονοειδούς μορφής. Εξετάστηκε επιπλέον η επίδραση της συχνότητας της διαταραχής, καθώς έγιναν μετρήσεις με μεγάλο εύρος διαφορετικών συχνοτήτων. Τέλος εφαρμόστηκαν διαφορετικά ύψη διαταραχής ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά του υμένα κάτω από μεγάλες και μικρές διαταραχές.

Στο επίπεδο τοίχωμα μελετήθηκε η ευστάθεια του υγρού υμένα σε δύο διαφορετικά πλάτη. Αρχικά έγιναν πειράματα στα 2/3 της ελεύθερης επιφάνειας του καναλιού και στη συνέχεια στο 1/3 της ελεύθερης επιφάνειας του καναλιού. Στο κανάλι ελεύθερης επιφάνειας πλάτους 2/3 του αρχικού, έγιναν πειράματα όπου εφαρμόστηκαν τα διαφορετικά ύψη της διαταραχής. Αντίστοιχα

στο κανάλι ελεύθερης επιφάνειας πλάτους ίσου με το $1/3$ του αρχικού χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος σέρβο-μηχανισμός ώστε να δημιουργηθεί διαταραχή μορφής ημίτονου.

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω μετρήσεων, έγινε μελέτη της ευστάθειας του υγρού υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένα τοιχώματα, το χαρακτηριστικό μήκος και ύψος διαμόρφωσης των οποίων ποικίλει.

Η τελευταία μελέτη της ευστάθειας του υγρού υμένα περιλάμβανε την επιβολή διαφορετικών συχνοτήτων διαταραχής. Οι διαφορετικές τιμές συχνοτήτων εφαρμόστηκαν τόσο σε επίπεδο όσο και σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα.

Ανεξάρτητα από τις συνθήκες στις οποίες γινόταν κάποια πειραματική μέτρηση, η διαδικασία ήταν πάντα η ίδια. Καθώς ρυθμιζόταν η γωνία κλίσης του καναλιού και γινόταν η σωστή ευθυγράμμισή του, ξεκινούσαμε τη βαθμονόμηση των μετρητικών οργάνων. Με το τέλος της βαθμονόμησης, ξεκινούσαν οι μετρήσεις του ύψους της υγρής στιβάδας. Αρχικά οι μετρήσεις λάμβαναν χώρα στην περιοχή της αστάθειας και σταδιακά με μικρή και διαδοχική μείωση του αριθμού Reynolds, γινόταν η μετάβαση της ροής από την ασταθή στην ευσταθή περιοχή. Κάθε μέτρηση ολοκληρωνόταν όταν ο λεπτός υμένας βρισκόταν σε πλήρη ευστάθεια.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γινόταν σε υπολογιστικά φύλλα ώστε να βρεθεί ο κρίσιμος αριθμός Reynolds και να παρατηρηθούν οποιεσδήποτε διαφορές με τη θεωρία ανάλυσης της γραμμικής ευστάθειας.

Κεφάλαιο 4

Πειραματικά αποτελέσματα

Για την ανάλυση της ευστάθειας της ροής υγρού υμένα, ήταν αναγκαίο να υποβληθεί η ροή σε μία μεγάλη κλίμακα διαταραχών διαφόρων μορφών και να παρατηρηθεί η διαδοχική εξέλιξή τους. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι συνθήκες των πειραμάτων όπου περιλαμβάνονται: η γωνία κλίσης του καναλιού (ϕ), το πλάτος του καναλιού (W), η περιεκτικότητα του διαλύματος κατά βάρος σε γλυκερίνη (% κ.β), η θερμοκρασία (T), το εύρος των αριθμών Reynolds (Re), η πυκνότητα και το κινηματικό ιξώδες του διαλύματος (ρ, ν), το μέγεθος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής και η μορφή του τοιχώματος ροής.

ϕ ($^{\circ}$)	W (mm)	f (Hz)	Περιεκτικότητα Γλυκερίνης (% κ.β)	T ($^{\circ}C$)	Re	ρ (kg/m ³)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	Μέγεθος διαταραχής (μm)	Τοίχωμα
5	250	0.16	30	25 \pm 1	6-59	1071	2.3	50	επίπεδο
7	250	0.16	40	25 \pm 1	6-20	1098	3.32	50	επίπεδο
10	250	0.16	56	25 \pm 1	3-16	1141	7.3	50	επίπεδο
15	250	0.16	66	25 \pm 1	1.5-8	1169	13.71	50	επίπεδο
20	250	0.16	73	25 \pm 1	0.9-6	1192	28.58	50	επίπεδο
25	250	0.16	76	25 \pm 1	0.5-4	1197	33.88	50	επίπεδο
30	250	0.16	80	25 \pm 1	0.4-3.6	1208	49.57	50	επίπεδο
5	166	0.16	30	25 \pm 1	5-28	1077	2.449	20&50	επίπεδο
7	166	0.16	40	25 \pm 1	5-20	1098.4	3.326	20&50	επίπεδο
10	166	0.16	56	25 \pm 1	2.5-9	1141.9	7.311	20&50	επίπεδο
15	166	0.16	66	25 \pm 1	1.98-4.70	1169.9	13.71	50	επίπεδο
20	166	0.16	72	25 \pm 1	1.29-3.84	1186.6	23.28	50	επίπεδο
25	166	0.16	76	25 \pm 1	1.00-2.82	1197.6	33.88	50	επίπεδο
30	166	0.16	80	25 \pm 1	0.91-2.55	1208.5	49.57	50	επίπεδο
5	83	0.16	30	25 \pm 1	12-35	1077	2.449	50	επίπεδο
7	83	0.16	40	25 \pm 1	8-23	1098.4	3.326	50	επίπεδο

10	83	0.16	56	25± 1	3.35-11	1141.9	7.311	50	επίπεδο
15	83	0.16	66	25± 1	3.39-7.68	1169.9	13.71	50	επίπεδο
20	83	0.16	72	25± 1	1.40-5.07	1186.6	23.28	50	επίπεδο
25	83	0.16	76	25± 1	1.07-4.11	1197.6	33.88	50	επίπεδο
30	83	0.16	80	25± 1	1.32-2.72	1208.5	49.57	50	επίπεδο
15	250	0.16	62	25± 1	2.61-6.49	1158.65	10.50	50	ημίτονο (L=2mm 2b= mm)
15	250	0.16	62	25± 1	3.00-20.16	1158.65	10.50	50	ημίτονο (L=12mm 2b=2 mm)
15	250	0.16	62	25± 1	3.23-18.23	1158.65	10.50	50	ημίτονο (L=50mm 2b=10mm)
15	250	0.16	62	25± 1	3.52-9.02	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.2mm)
15	250	0.16	62	25± 1	4.14-18.31	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
15	250	0.16	62	25± 1	4.23-20.16	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=20mm 2b=2mm)
15	250	0.16	62	25± 1	3.09-18.26	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=24mm 2b=0.2mm)
10	250	2	62	25±1	5.79-8.99	1158.65	10.50	50	επίπεδο
10	250	1.75	62	25± 1	5.97-9.67	1158.65	10.50	50	επίπεδο
10	250	1.50	62	25± 1	6.30-10.14	1158.65	10.50	50	επίπεδο
10	250	1.25	62	25± 1	5.55-10.02	1158.65	10.50	50	επίπεδο
10	250	1	62	25± 1	5.17-10.84	1158.65	10.50	50	επίπεδο
10	250	0.75	62	25± 1	5.59-9.81	1158.65	10.50	50	επίπεδο
10	250	0.5	62	25± 1	5.54-9.50	1158.65	10.50	50	επίπεδο
10	250	0.25	62	25± 1	4.77-8.96	1158.65	10.50	50	επίπεδο
15	250	2	62	25± 1	4.81-7.56	1158.65	10.50	50	επίπεδο
15	250	1.75	62	25± 1	4.78-7.13	1158.65	10.50	50	επίπεδο
15	250	1.50	62	25±1	4.42-7.60	1158.65	10.50	50	επίπεδο
15	250	1.25	62	25± 1	4.64-7.81	1158.65	10.50	50	επίπεδο
15	250	1	62	25± 1	4.41-8.22	1158.65	10.50	50	επίπεδο
15	250	0.75	62	25± 1	3.91-8.40	1158.65	10.50	50	επίπεδο
15	250	0.5	62	25± 1	4.22-7.41	1158.65	10.50	50	επίπεδο
15	250	0.25	62	25± 1	3.84-7.19	1158.65	10.50	50	επίπεδο
10	250	2	62	25± 1	7.29-11.00	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
10	250	1.75	62	25±1	8.28-10.82	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)

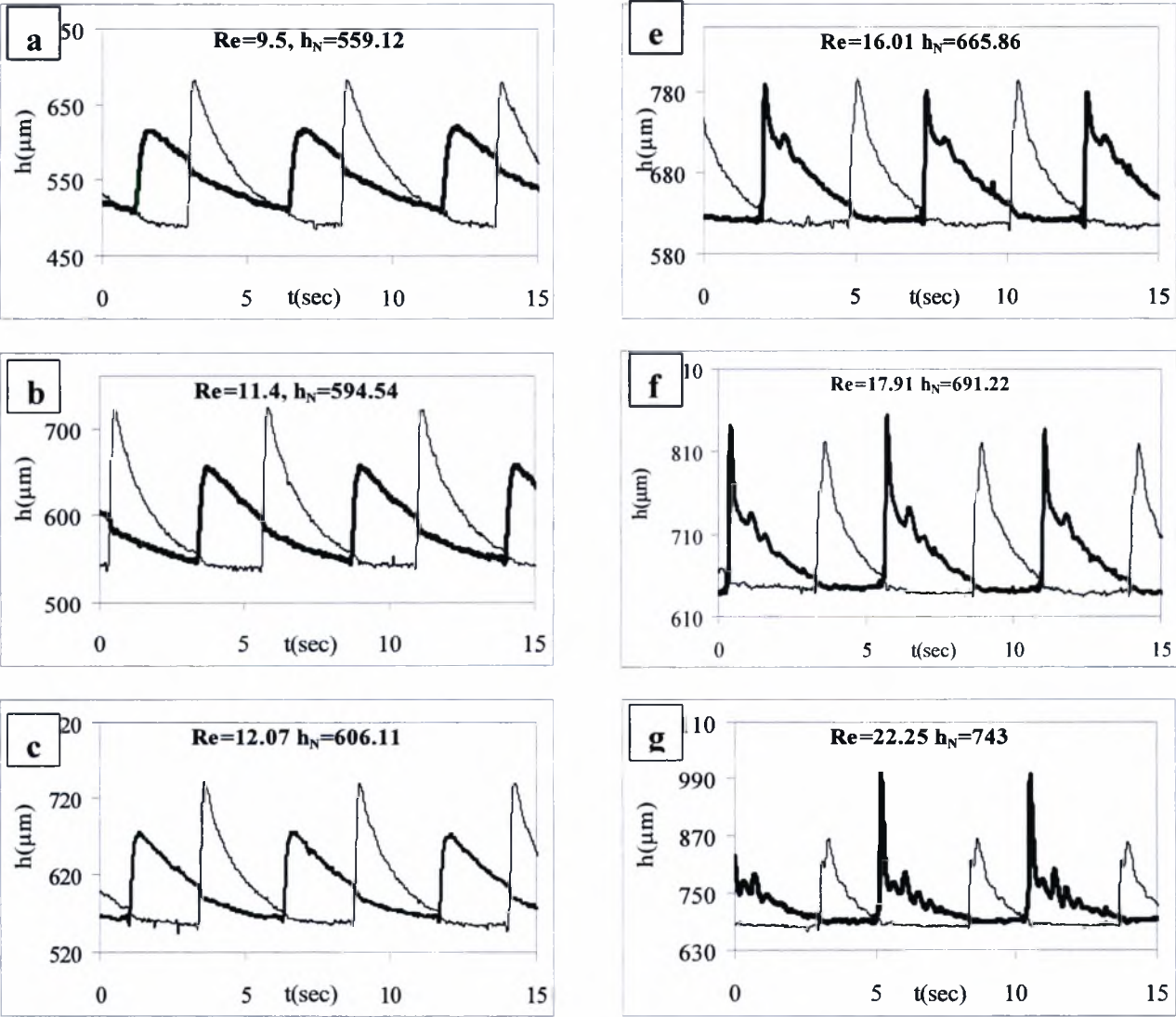
10	250	1.50	62	25± 1	8.69-12.14	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
10	250	1.25	62	25± 1	8.69-11.63	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
10	250	1	62	25±1	8.93-12.88	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
10	250	0.75	62	25± 1	10.12-14.17	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
10	250	0.5	62	25± 1	9.73-16.08	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
10	250	0.25	62	25± 1	9.34-13.05	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
15	250	2	62	25± 1	5.67-9.58	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
15	250	1.75	62	25± 1	6.06-10.78	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
15	250	1.50	62	25± 1	5.91-9.70	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
15	250	1.25	62	25± 1	6.03-8.78	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
15	250	1	62	25± 1	6.26-10.50	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
15	250	0.75	62	25±1	6.25-9.21	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
15	250	0.5	62	25±1	6.35-9.10	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)
15	250	0.25	62	25± 1	6.06-8.59	1158.65	10.50	50	ορθογωνικό (L=12mm 2b=0.8mm)

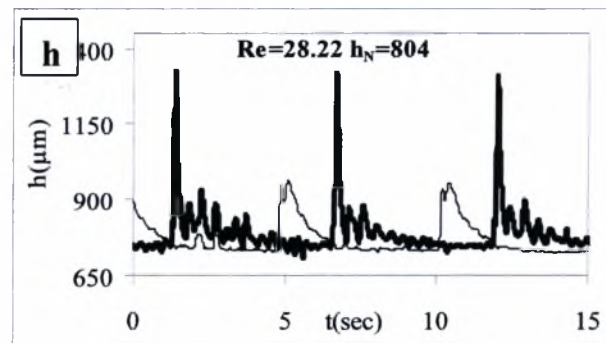
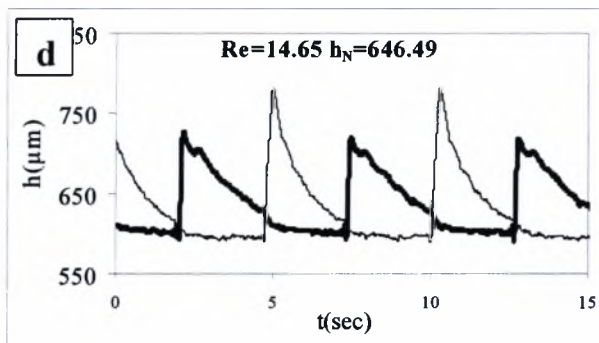
Πίνακας 4.1 Συνοπτικός πίνακας των πειραματικών μετρήσεων με τις παραμέτρους τους

4.1 Η μεθοδολογία διαχωρισμού της μετάβασης από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή

Χρησιμοποιώντας την αγωγιμομετρική τεχνική δόθηκε η δυνατότητα της μέτρησης του πάχους της υγρής στοιβάδας $h(x_o, y_o, t)$ σε δύο σημεία κατάντη της ροής. Συγκεκριμένα μετρήθηκε το πάχος του υγρού υμένα σε απόσταση $x_o=15\text{cm}$ και σε απόσταση $x_o=65\text{cm}$ από την έναρξη του καναλιού. Σκοπός είναι να εξετάσουμε το ύψος του δημιουργούμενου κύματος ($h_{\text{max}}-h_{\text{min}}$) και στα δύο σημεία μέτρησης. Μία πρώτη εκτίμηση της περιοχής μετάβασης πραγματοποιείται όταν το πλάτος του δημιουργούμενου κύματος μειώνεται ή αυξάνεται κατάντη της ροής. Μείωση του πλάτους σημαίνει ευσταθής ροή, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η ροή χαρακτηρίζεται ασταθής.

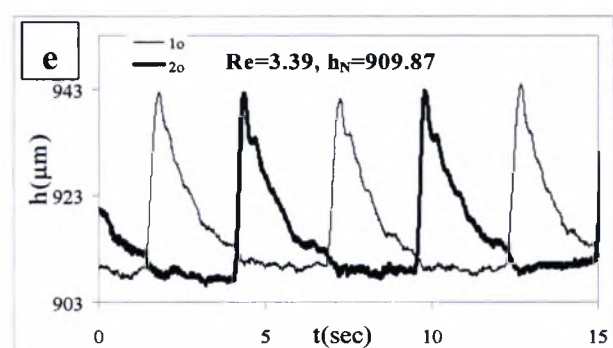
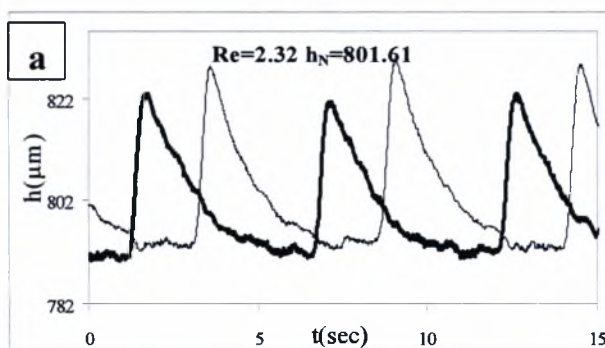
Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15\text{ cm}$ και $-x_o=65\text{cm}$). Από τα διαγράμματα αυτά, υπάρχει μία πρώτη εκτίμηση για τη μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή.

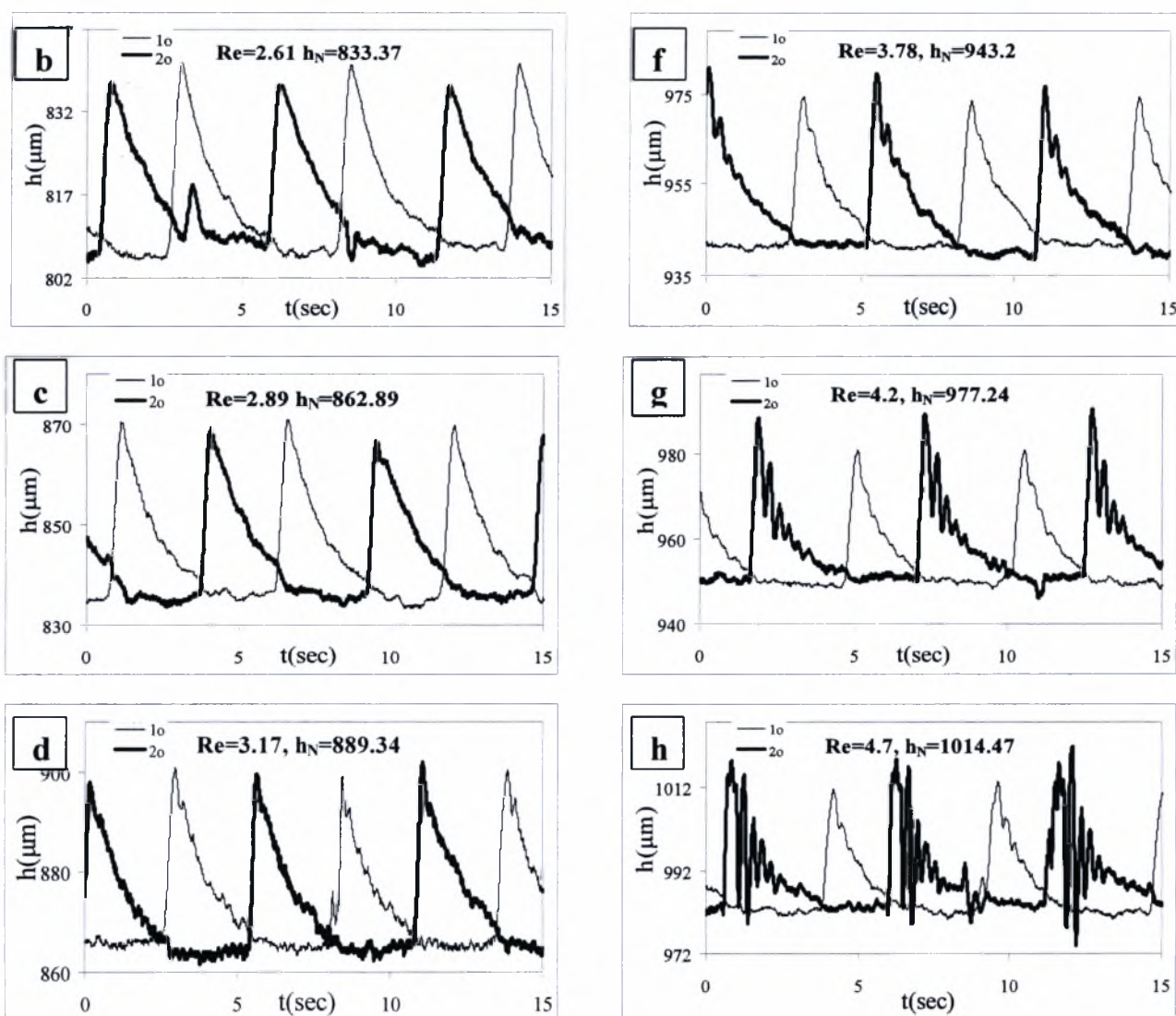




Σχήμα 4.1 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15$ cm και $-x_o=65$ cm), για διάλυμα 30% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=5^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 9.5$, b) $Re = 11.4$, c) $Re = 12.07$, d) $Re = 14.65$, e) $Re = 16.01$, f) $Re = 17.91$, g) $Re = 22.25$, h) $Re = 28.22$

Στο σχήμα 4.1 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15$ cm και $-x_o=65$ cm), για διάλυμα 30% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=5^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm. Στα διαγράμματα a, b, c, d και e το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα f, g και h το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα μεταξύ των αριθμών Reynolds 16.01 και 17.91. Με περαιτέρω αύξηση του αριθμού Reynolds, πέρα από την αύξηση της διαφοράς του ύψους κύματος μεταξύ των δύο θέσεων μέτρησης, παρατηρείται και διαφοροποίηση της μορφής του κύματος.

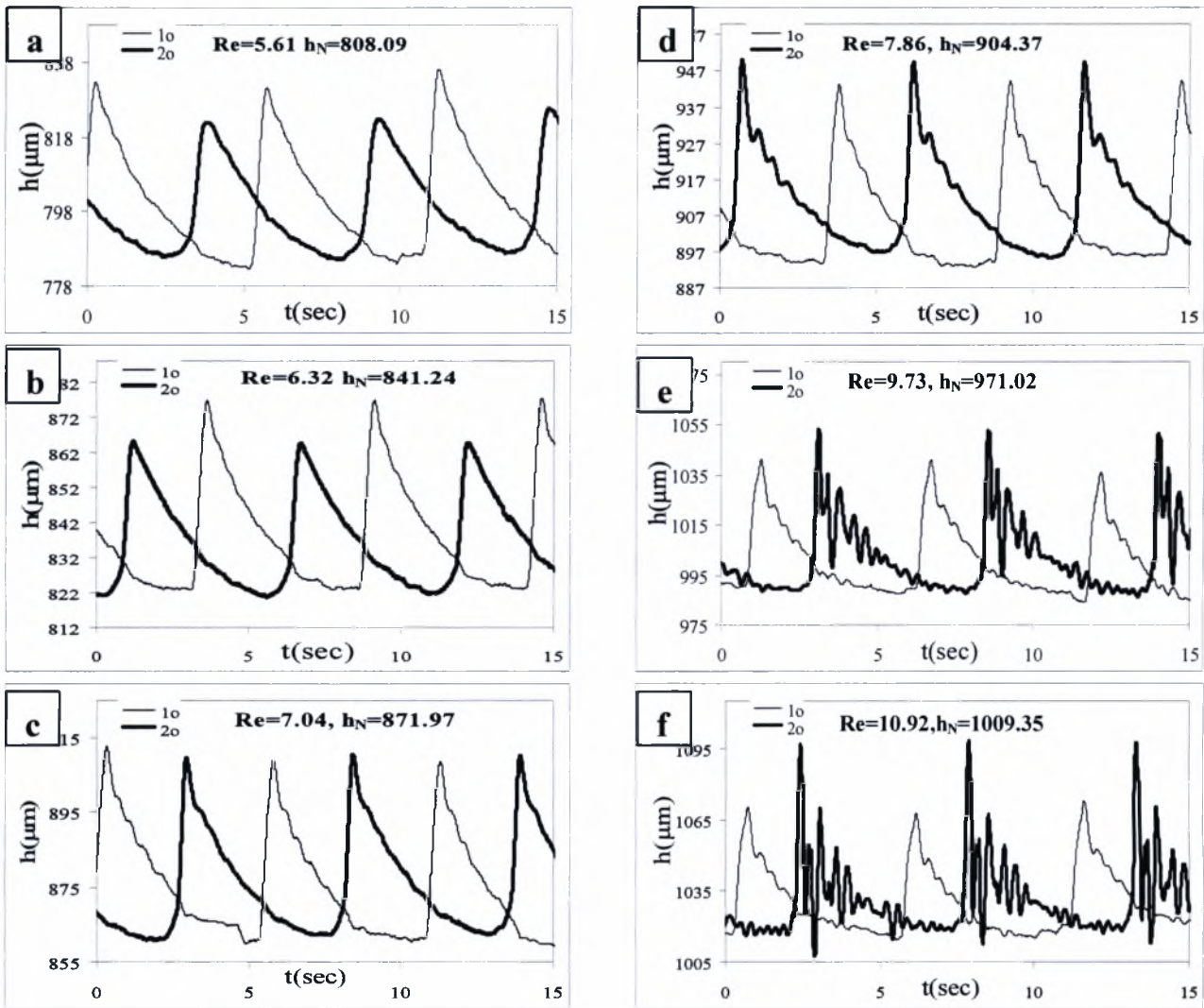




Σχήμα 4.2 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15$ cm και $-x_o=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\phi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=166$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 2.32$, b) $Re= 2.61$, c) $Re= 2.89$, d) $Re= 3.17$, e) $Re= 3.39$, f) $Re=3.78$, g) $Re=4.2$, h) $Re=4.7$

Στο σχήμα 4.2 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15$ cm και $-x_o=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\phi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=166$ mm. Στα διαγράμματα a, b, c, d και e το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα f, g και h το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα μεταξύ των αριθμών Reynolds

3.39 και 3.78. Με περαιτέρω αύξηση του αριθμού Reynolds, πέρα από την αύξηση της διαφοράς του ύψους κύματος μεταξύ των δύο θέσεων μέτρησης, παρατηρείται και διαφοροποίηση της μορφής του κύματος.



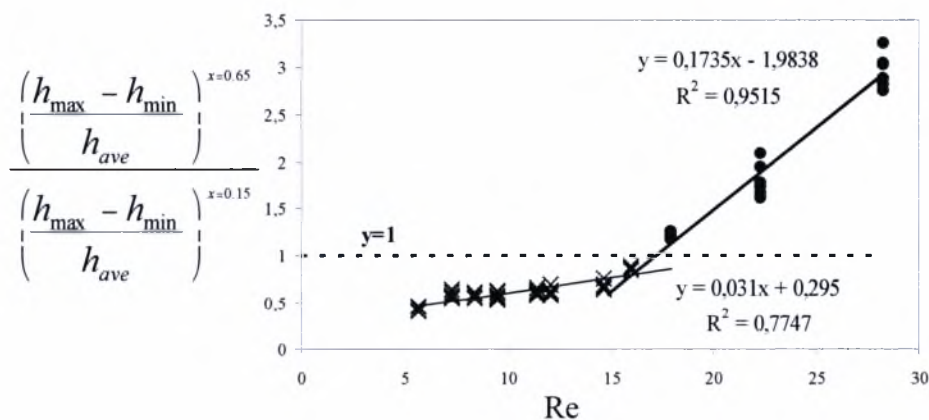
Σχήμα 4.3 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 56% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=83\text{mm}$ και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 5.61$, b) $Re = 6.32$, c) $Re = 7.04$, d) $Re = 7.86$, e) $Re = 9.73$, f) $Re = 10.92$

Στο σχήμα 4.3 βλέπουμε τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 56% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=83\text{mm}$. Στα διαγράμματα a, b και c και το ύψος του κύματος στο πρώτο μετρητικό είναι μεγαλύτερο από το ύψος που μετράται στο δεύτερο μετρητικό. Αυτό σημαίνει ότι ο υμένας βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή. Εν αντιθέσει στα διαγράμματα d, e και f το πάχος του υμένα στο δεύτερο μετρητικό είναι πιο μεγάλο από το ύψος στο πρώτο μετρητικό. Αυτό είναι ένδειξη ασταθούς ροής. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι η

μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή λαμβάνει χώρα μεταξύ των αριθμών Reynolds 7.04 και 7.86. Με περαιτέρω αύξηση του αριθμού Reynolds, πέρα από την αύξηση της διαφοράς του ύψους κύματος μεταξύ των δύο θέσεων μέτρησης, παρατηρείται και διαφοροποίηση της μορφής του κύματος καθώς επίσης και δημιουργία δευτερευόντων προπορευόντων κυμάτων μικρότερου ύψους.

4.2 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Re

Για την εύρεση του κρίσιμου αριθμού Re , δηλαδή του αριθμού όπου γίνεται η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή βρίσκουμε το πλάτος του δημιουργούμενου κύματος $h_{max}-h_{min}$ στις δύο θέσεις μέτρησης. Αυτό το πλάτος το διαιρούμε με το μέσο όρο του σήματος ώστε να αποφύγουμε τυχόν ατέλειες της βαθμονόμησης. Στη συνέχεια βρίσκουμε τον λόγο του προαναφερόμενου μεγέθους, $\frac{h_{max} - h_{min}}{h_{ave}}$, για τις δύο θέσεις κατάντη της ροής. Όταν ο λόγος είναι >1 σημαίνει ότι βρισκόμαστε στην ασταθή περιοχή. Ήδη, από το προηγούμενο βήμα έχουμε βρει τους δύο αριθμούς Re μεταξύ των οποίων πραγματοποιείται η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή. Προσεγγίζουμε γραμμικά τόσο τα σημεία της ευστάθειας όσο και τα σημεία της αστάθειας. Ο κρίσιμος αριθμός Re προκύπτει είτε από την τομή της γραμμής ευστάθειας με τη γραμμή ευστάθειας είτε από την τομή της γραμμής αστάθειας με την $y=1$.

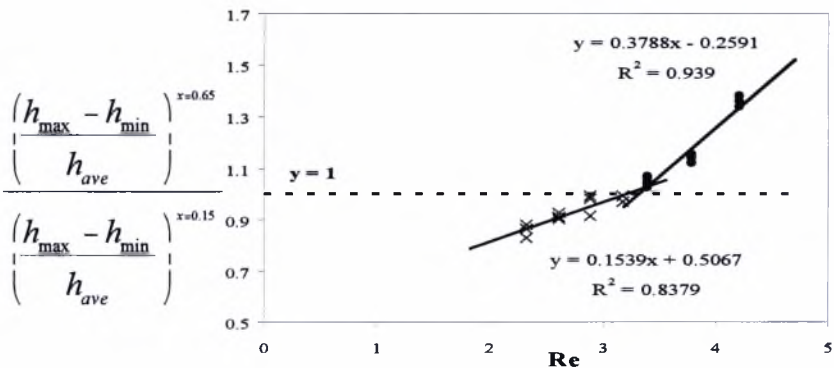


Σχήμα 4.4 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=5^\circ$ και $w=250\text{mm}$

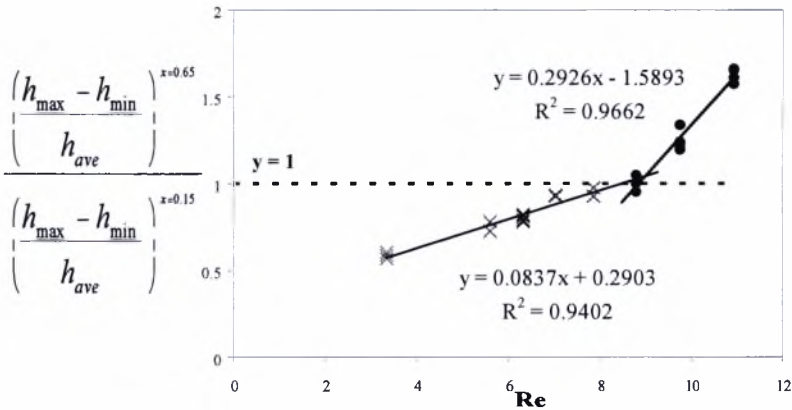
Στο σχήμα 4.4 περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds, δηλαδή του αριθμού στον οποίο γίνεται η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή. Στον ένα άξονα βρίσκεται ο αριθμός Reynolds και στον άλλο η διαφορά του μέγιστου από το ελάχιστο ύψος κύματος. Η διαφορά αυτή διαιρείται με το μέσο ύψος κύματος για απαλοιφή τυχών σφαλμάτων βαθμονόμησης. Από την τομή της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή

ευστάθειας προκύπτει ο κρίσιμος αριθμός ίσος με 15.99. Κάνοντας χρήση του άλλου τρόπου εκτίμησης του κρίσιμου αριθμού, προκύπτει ότι ο αριθμός μετάβασης είναι ίσος με 17.99.

Στο σχήμα 4.5 περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds, δηλαδή του αριθμού στον οποίο γίνεται η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή. Στον ένα άξονα βρίσκεται ο αριθμός Reynolds και στον άλλο η διαφορά του μέγιστου από το ελάχιστο ύψος κύματος. Η διαφορά αυτή διαιρείται με το μέσο ύψος κύματος για απαλοιφή τυχών σφαλμάτων βαθμονόμησης. Από την τομή της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή ευστάθειας προκύπτει ο κρίσιμος αριθμός ίσος με 3.40. Κάνοντας χρήση του άλλου τρόπου εκτίμησης του κρίσιμου αριθμού, προκύπτει ότι ο αριθμός μετάβασης είναι ίσος με 3.32.



Σχήμα 4.5 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για φ=15° και w=166mm



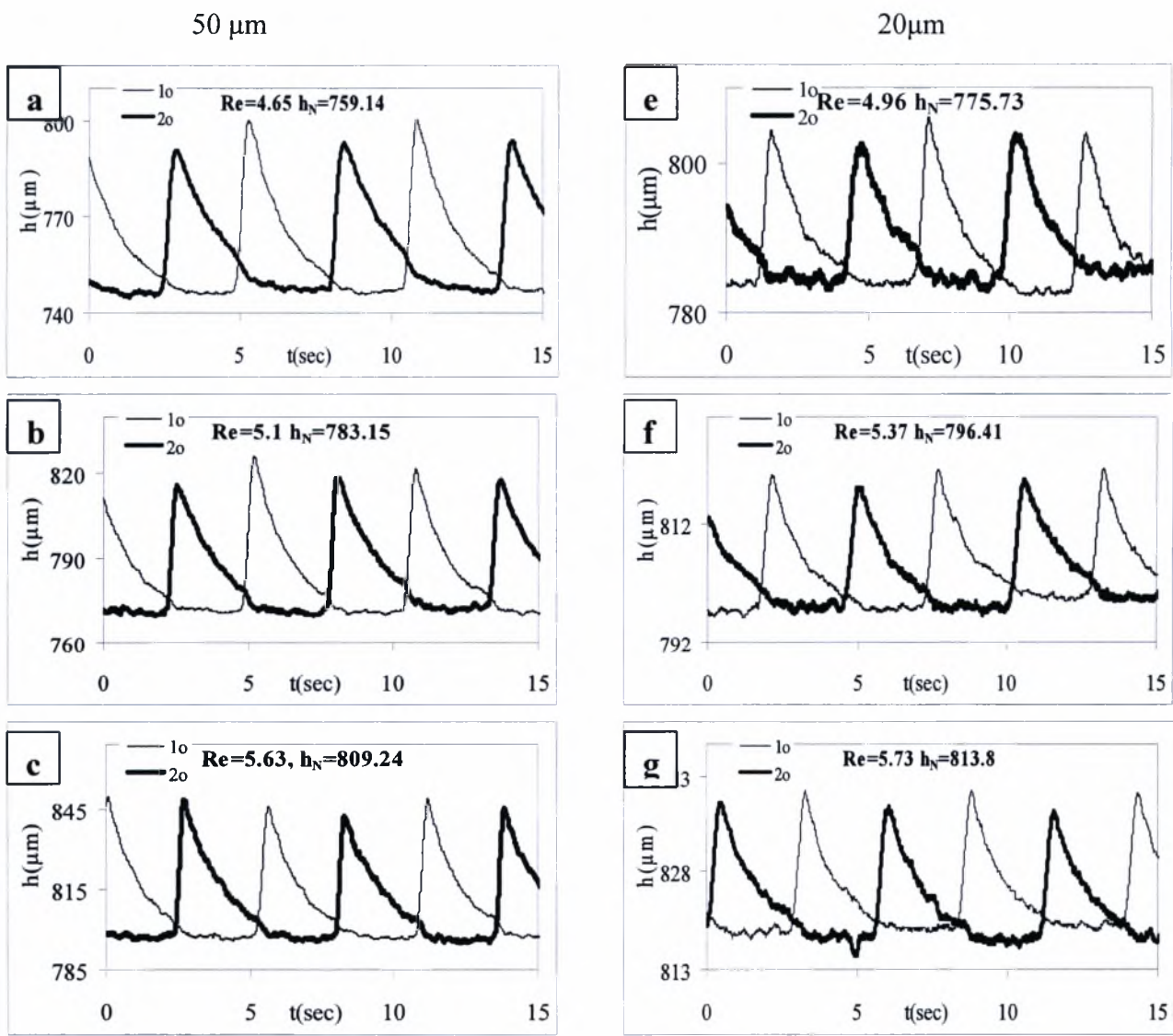
Σχήμα 4.6 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για φ=10° και w=83mm

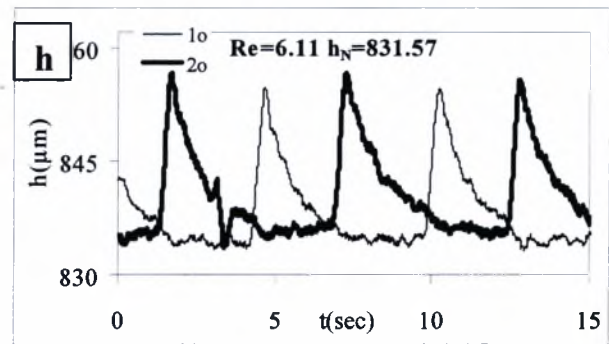
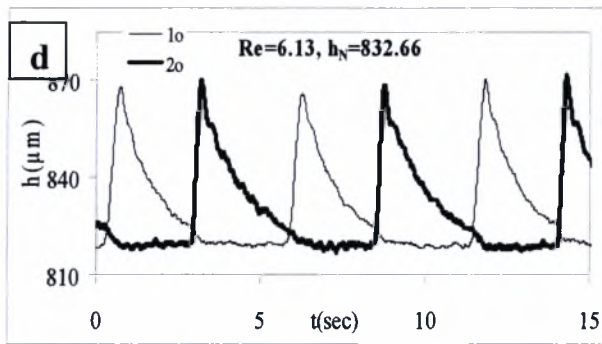
Στο σχήμα 4.6 περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds, δηλαδή του αριθμού στον οποίο γίνεται η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή. Στον ένα άξονα βρίσκεται ο αριθμός Reynolds και στον άλλο η διαφορά του μέγιστου από το ελάχιστο ύψος κύματος. Η διαφορά αυτή διαιρείται με το μέσο ύψος κύματος για απαλοιφή τυχών σφαλμάτων βαθμονόμησης. Από την τομή της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή ευστάθειας προκύπτει ο κρίσιμος αριθμός ίσος με 8.99. Κάνοντας χρήση του άλλου τρόπου εκτίμησης του κρίσιμου αριθμού, προκύπτει ότι ο αριθμός μετάβασης είναι ίσος με 8.84.

4.3 Η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Re από το είδος και το μέγεθος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής στο επίπεδο τοίχωμα

4.3.1 Εξάρτηση από το μέγεθος της διαταραχής

Το είδος (μορφή) και το μέγεθος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής επηρεάζουν δραστικά την εξέλιξη της διαταραχής κατάντη της ροής. Σύμφωνα με τον Drazin (2002), θα πρέπει το πλάτος της επιβαλλόμενης διαταραχής να είναι αρκετά μικρό για την αποφυγή διαφόρων μη-γραμμικών φαινομένων. Επίσης στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εύρεση της εξάρτησης της ευστάθειας από τη μορφή της επιβαλλόμενης διαταραχής. Για τους προαναφερόμενους λόγους πραγματοποιήθηκαν ορισμένα πειράματα στις ίδιες συνθήκες ροής αλλά σε δύο διαφορετικά πλάτη της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής.

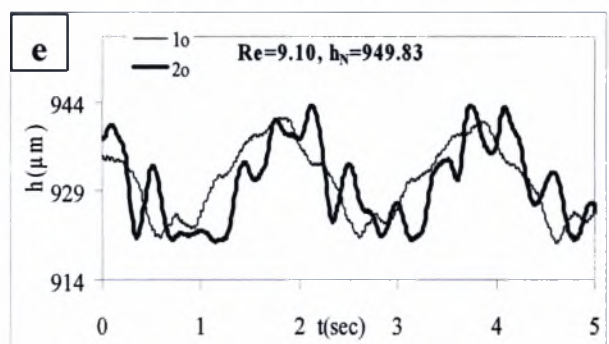
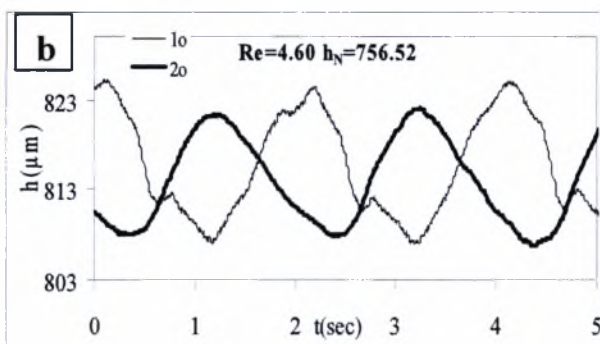
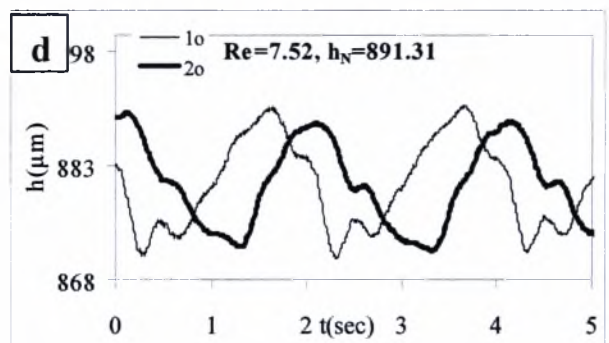
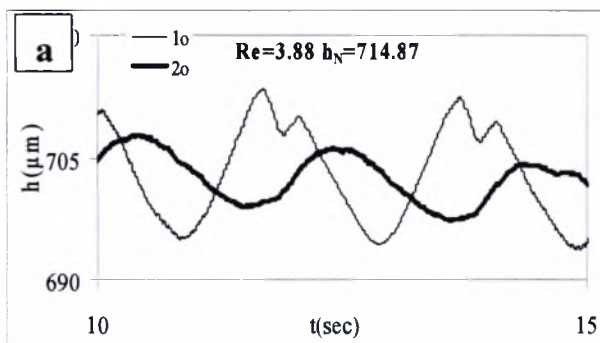


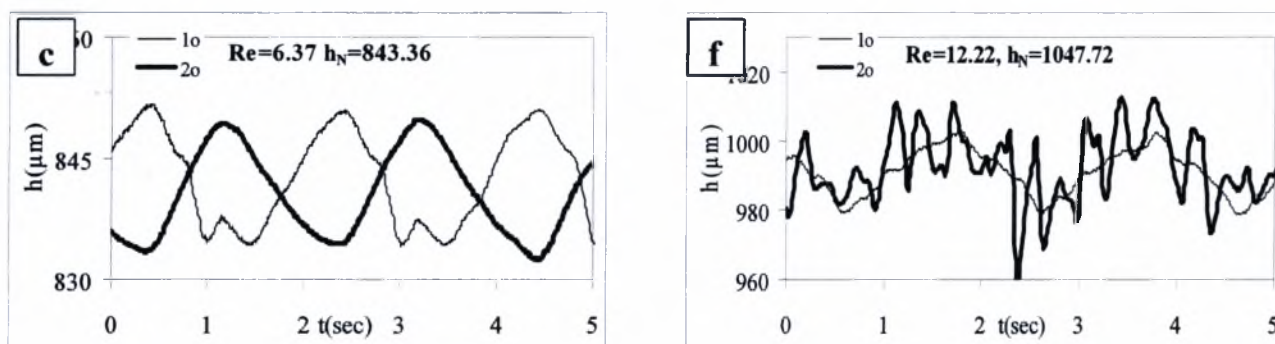


Σχήμα 4.7 Η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Re από το ύψος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής για $\phi=10^\circ$. Το μέγεθος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής είναι: $50\mu m$ (a,b,c,d) και $20\mu m$ (e,f,g,h) ενώ η συχνότητα είναι $0,16\text{ Hz}$.

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η μετάβαση του υγρού υμένα από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή. Οι συνθήκες στις οποίες έγιναν οι συγκεκριμένες μετρήσεις ήταν όμοιες, με μόνη διαφορά το μέγεθος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Στα διαγράμματα a,b,c,d το μέγεθος της διαταραχής είναι $50\mu m$ ενώ στα διαγράμματα e,f,g,h το μέγεθος είναι $20\mu m$. Και στις δύο περιπτώσεις η μετάβαση παρουσιάζεται σε όμοιους αριθμούς Reynolds και συγκεκριμένα στον $Re=6.1$. Από τις συγκεκριμένες μετρήσεις παρατηρούμε ότι το διαφορετικό ύψος της εισαγόμενης διαταραχής δεν επηρεάζει την ευστάθεια του υμένα.

4.3.2 Εξάρτηση από τη μορφή της διαταραχής



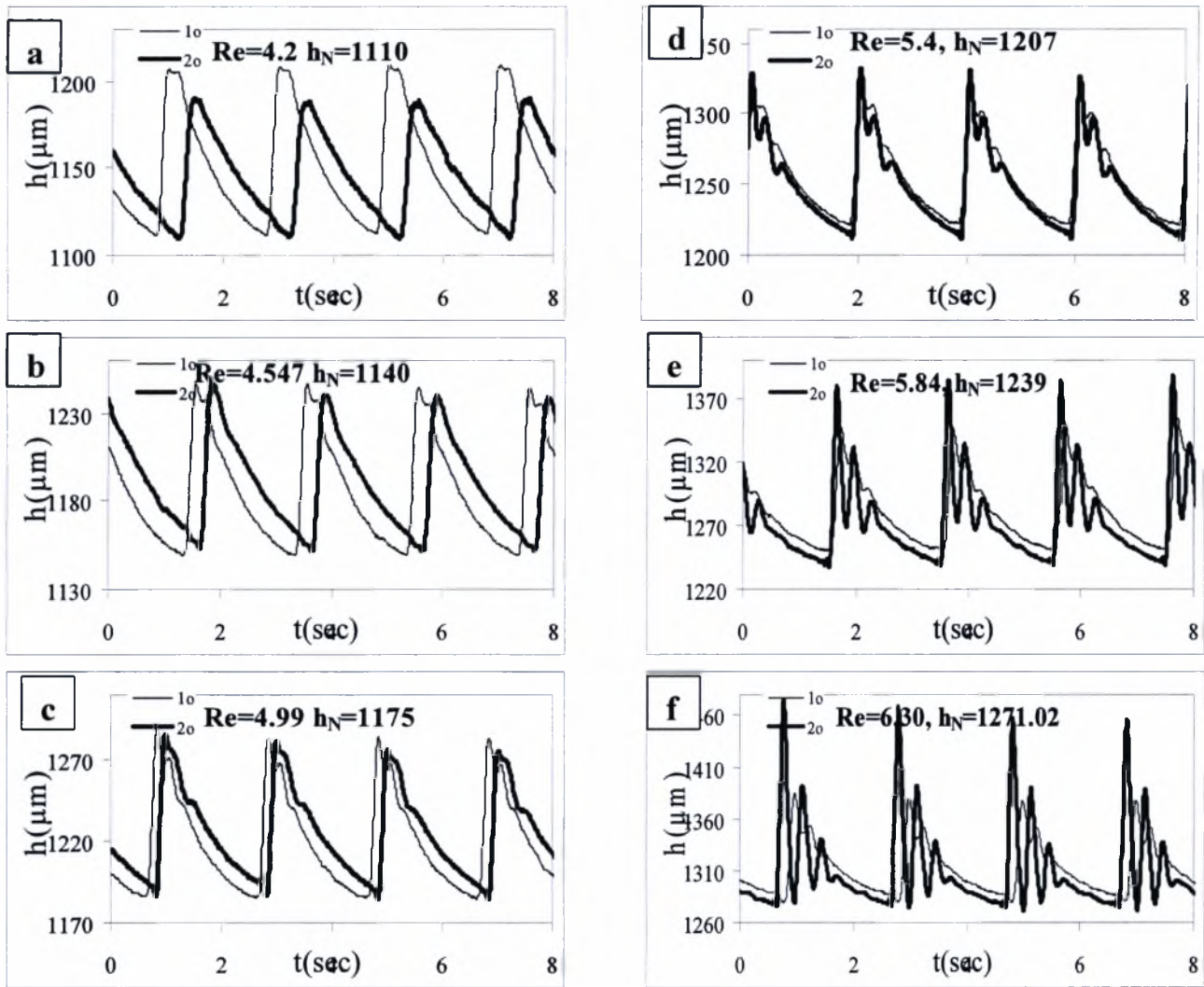


Σχήμα 4.8 Η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Re από το είδος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής για $\varphi=10$. Το μέγεθος της διαταραχής είναι $15 \mu\text{m}$ ενώ η συχνότητα είναι 0.5 Hz . Η αστάθεια παρουσιάζεται σε $Re=9.20$.

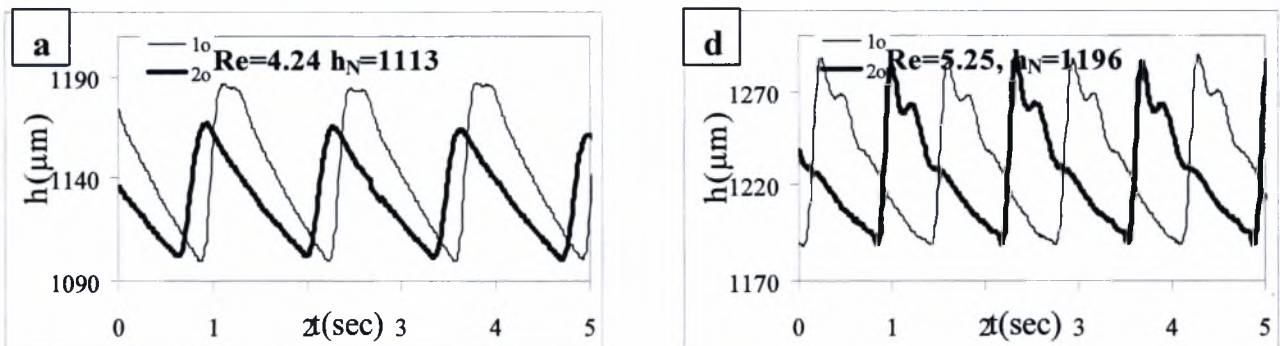
Στο σχήμα 4.8 παρατηρούμε πειράματα στα οποία εφαρμόστηκε μία περιοδική διαταραχή της οποίας η μορφή ήταν ημιτονοειδής. Σε αντίθεση με όλα τα προηγούμενα πειράματα, όπου η επιβαλλόμενη διαταραχή είχε τη μορφή κατακόρυφου υδραυλικού άλματος, εφαρμόσαμε με κατάλληλη διάταξη διαταραχή ημίτονου με συχνότητα 0.5 Hz . Συγκρίνοντας με τα αντίστοιχα πειράματα όπου η διαταραχή είχε τη μορφή υδραυλικού άλματος παρατηρείται ταύτιση του αριθμού μετάβασης. Στην περίπτωση της διαταραχής με υδραυλικό άλμα η μετάβαση παρατηρείται στο $Re \approx 9$ ενώ στην περίπτωση της ημιτονοειδούς διαταραχής η μετάβαση γίνεται στο $Re \approx 9.20$. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η μορφή της διαταραχής δεν επηρεάζει την ευστάθεια του υμένα και μάλιστα αποδεικνύεται ότι η διαταραχή της μορφής υδραυλικού άλματος αποσβένει κατόντη της ροής και δεν καταλήγει σε κάποια μορφή ημίτονου. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται δευτερεύοντα κύματα με αύξηση του αριθμού Reynolds όπως συνέβη και στα πειράματα με διαταραχή κατακόρυφου υδραυλικού άλματος.

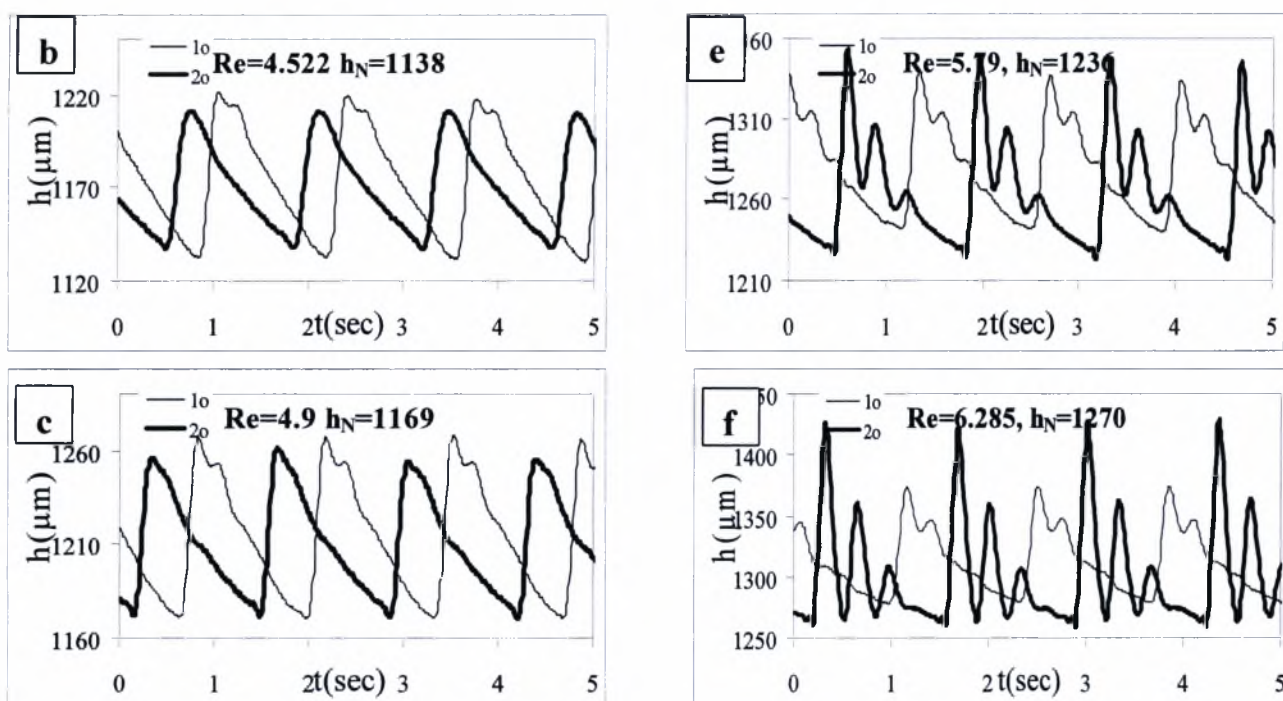
4.4 Η επίδραση της συχνότητας της διαταραχής στη ροή υγρού υμένα για το επίπεδο τοίχωμα

Σε όλα τα παραπάνω πειράματα η επιβαλλόμενη διαταραχή που εισάγονταν στο σύστημα, είχε τιμή συχνότητας ίση με $f = 0.16 \text{ Hz}$. Προέκυψε λοιπόν το ερώτημα, αν η συχνότητα με την οποία διαταράσσεται το σύστημα επιδρά στην ευστάθεια της ροής. Πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων στα οποία εφαρμόστηκαν διαφορετικές τιμές της συχνότητας. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν οι παρακάτω τιμές συχνότητας $f = 2 \text{ Hz}$, $f = 1.75 \text{ Hz}$, $f = 1.50 \text{ Hz}$, $f = 1.25 \text{ Hz}$, $f = 1 \text{ Hz}$, $f = 0.75 \text{ Hz}$, $f = 0.50 \text{ Hz}$ και $f = 0.25 \text{ Hz}$. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα που δείχνουν τη μετάβαση της ροής από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή για γωνία κλίσης του καναλιού $\varphi = 10^\circ$ και $\varphi = 15^\circ$.

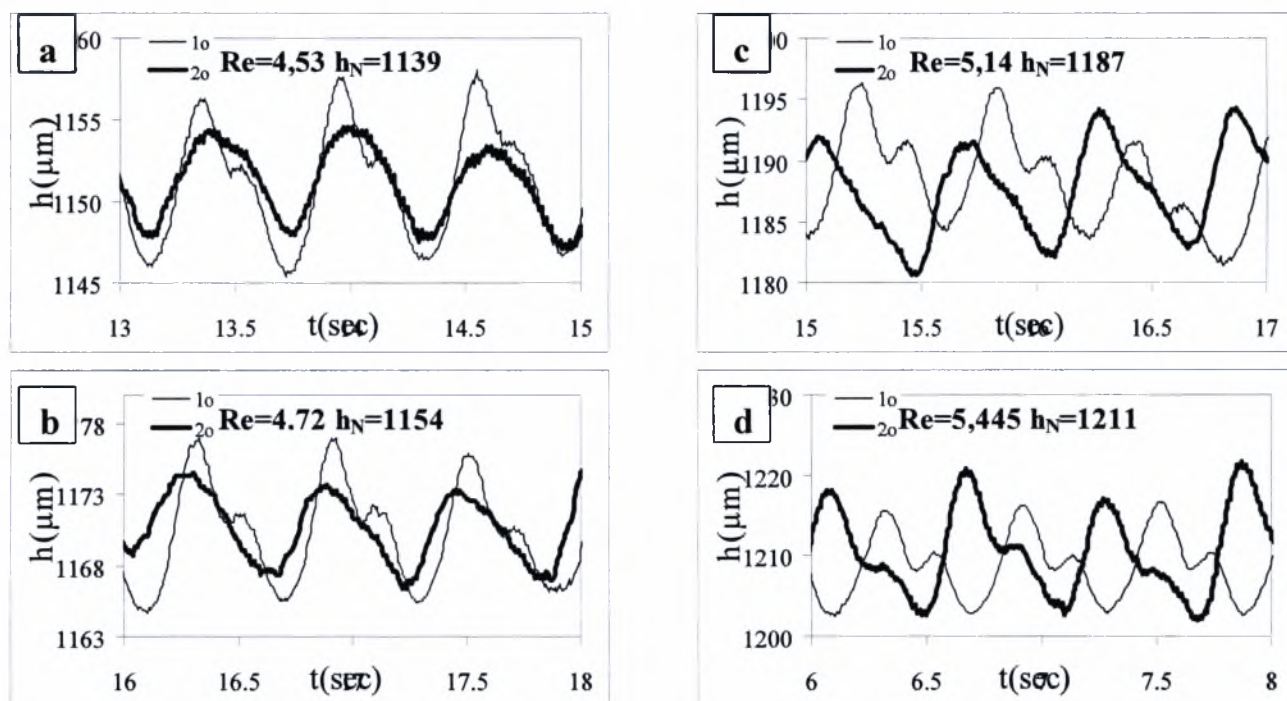


Σχήμα 4.9 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{mm}$, συχνότητας διαταραχής $f=0.5\text{ Hz}$ για τους παρακάτω αριθμούς Re : a) $Re = 4.2$, b) $Re = 4.54$, c) $Re = 4.99$, d) $Re=5.4$, e) $Re=5.84$ και f) $Re=6.30$

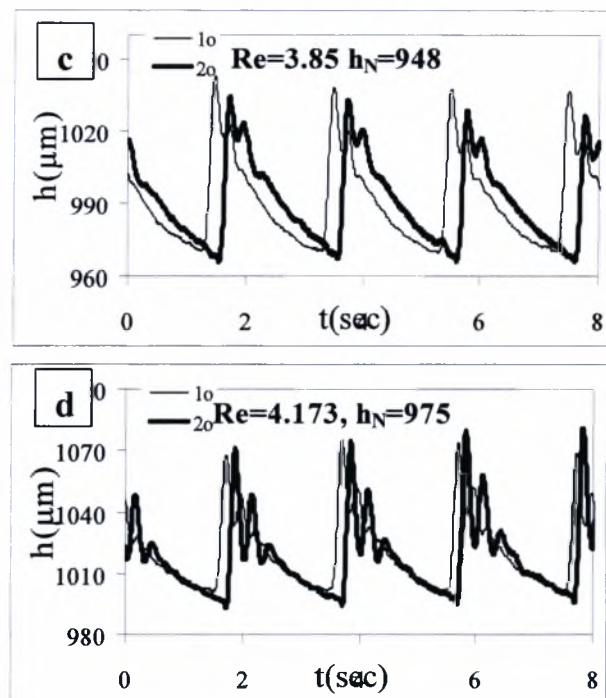
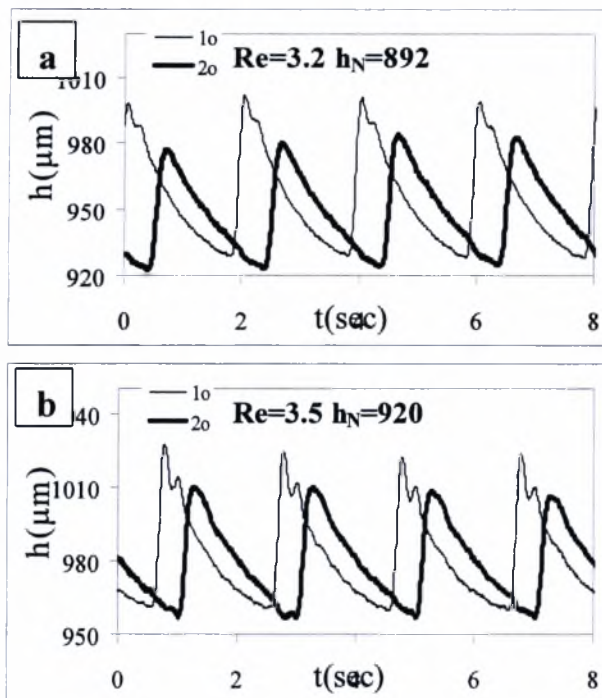




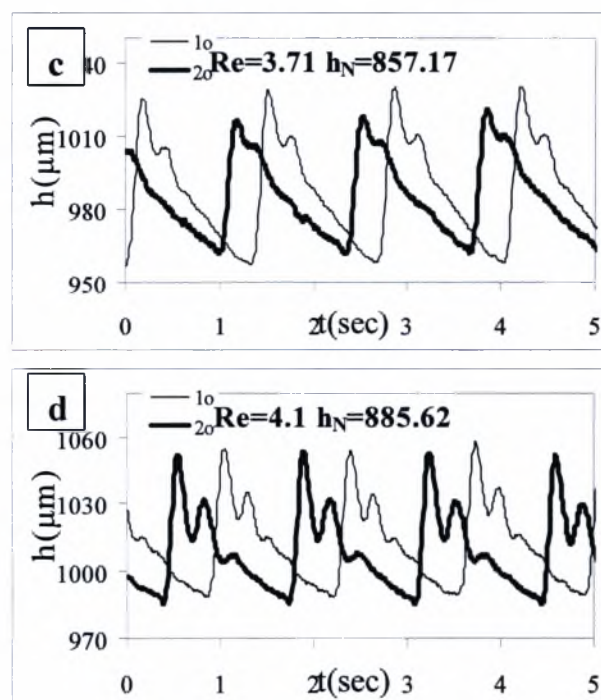
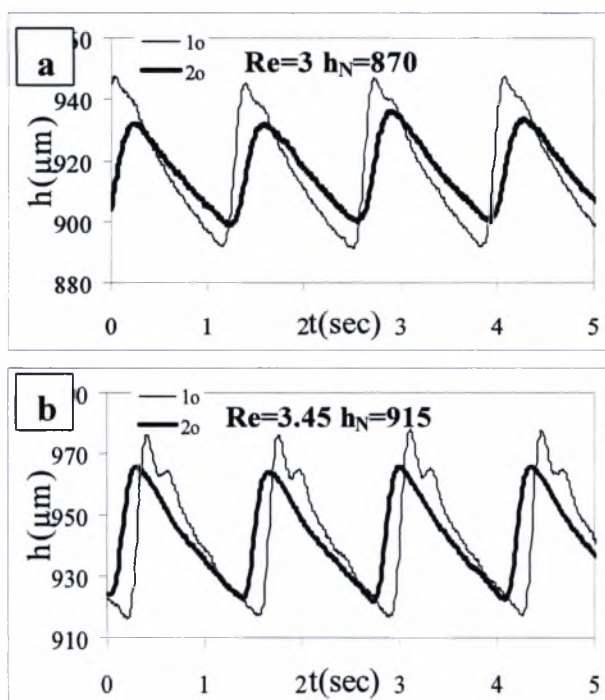
Σχήμα 4.10 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm, συχνότητας διαταραχής $f=0.75$ Hz για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 4.24$, b) $Re = 4.52$, c) $Re = 4.99$, d) $Re = 5.25$, e) $Re = 5.79$ και f) $Re = 6.28$

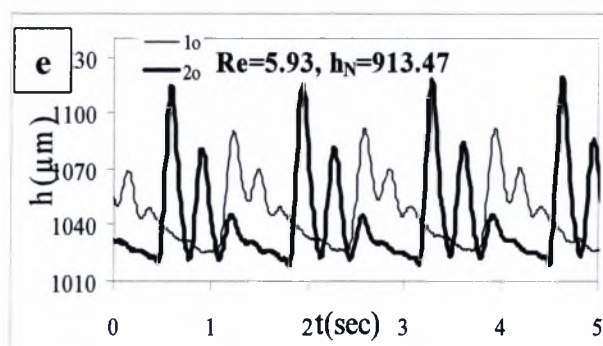


Σχήμα 4.11 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm, συχνότητας διαταραχής $f=1.75$ Hz για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 4.53$, b) $Re = 4.72$, c) $Re = 5.14$, d) $Re = 5.45$ και e) $Re = 5.7$

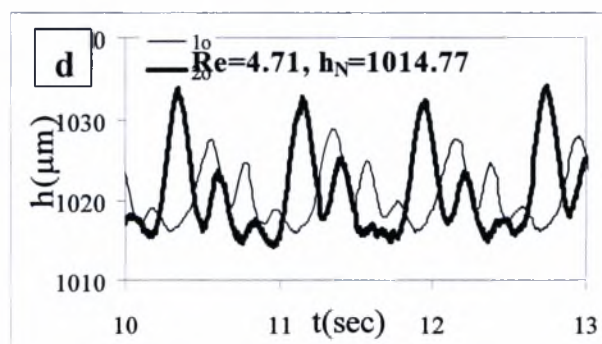
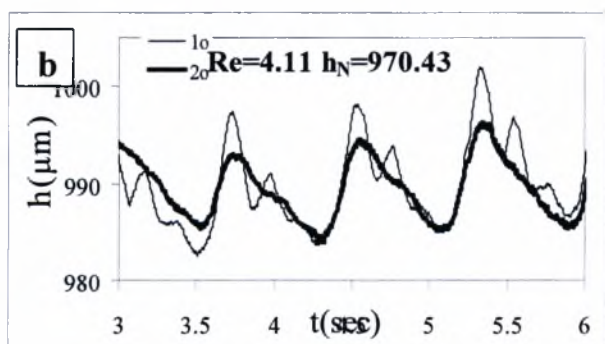
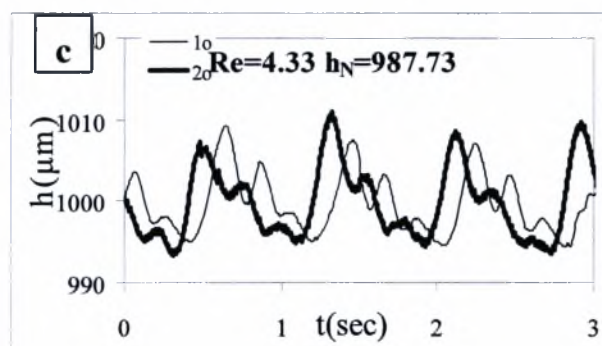
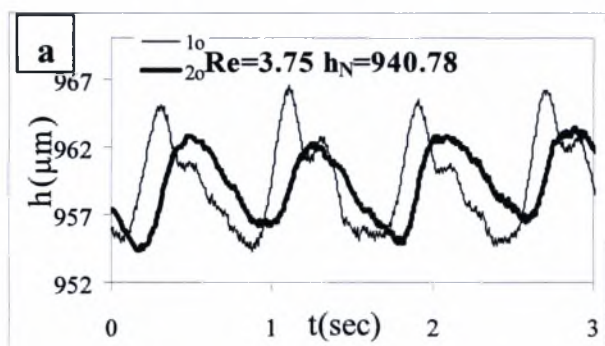


Σχήμα 4.12 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm, συχνότητας διαταραχής $f=0.5$ Hz για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $\text{Re}=3$, b) $\text{Re}=3.5$, c) $\text{Re}=3.85$ και d) $\text{Re}=4.17$

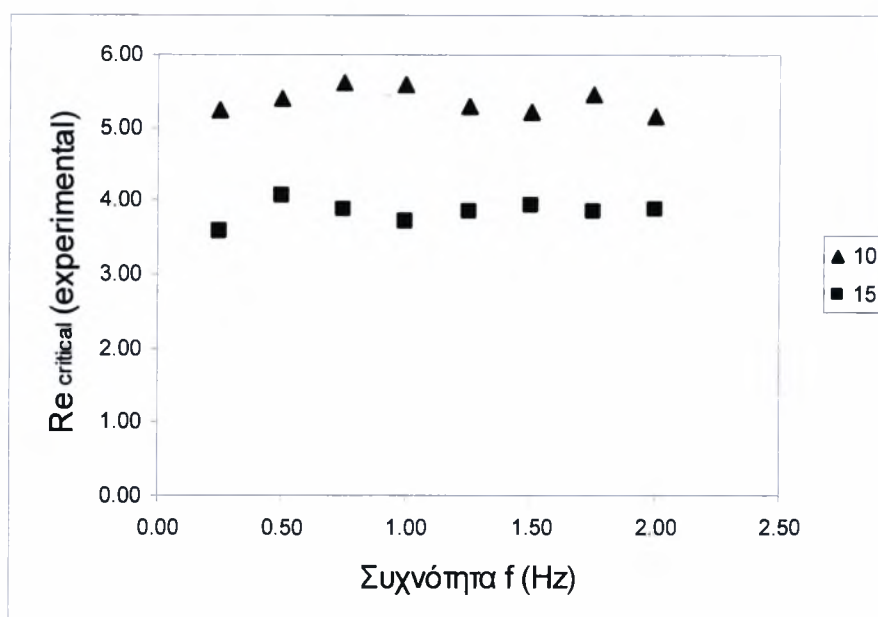




Σχήμα 4.13 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm, συχνότητας διαταραχής $f=0.75$ Hz για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 3,01$, b) $Re = 3,45$, c) $Re = 3,71$, d) $Re=4,10$ και e) $Re=5.93$



Σχήμα 4.14 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm, συχνότητας διαταραχής $f=1.25$ Hz για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 3,75$, b) $Re = 4,11$, c) $Re = 4,33$ και d) $Re=4,71$

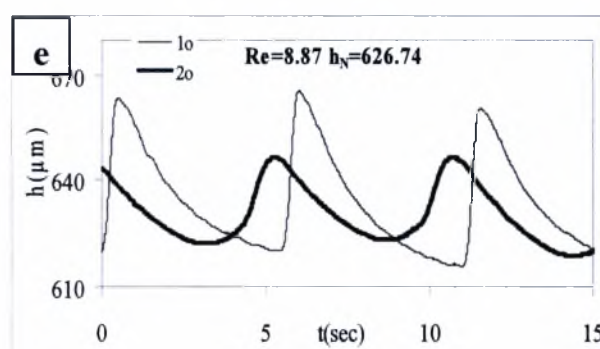
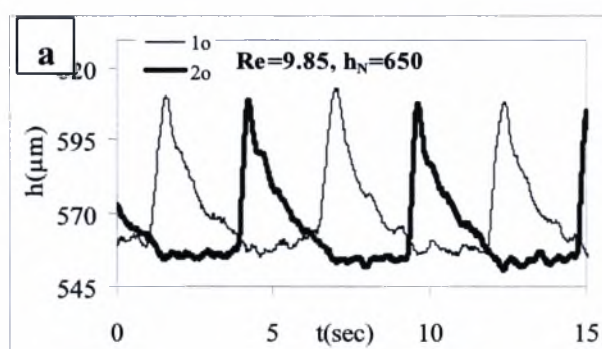


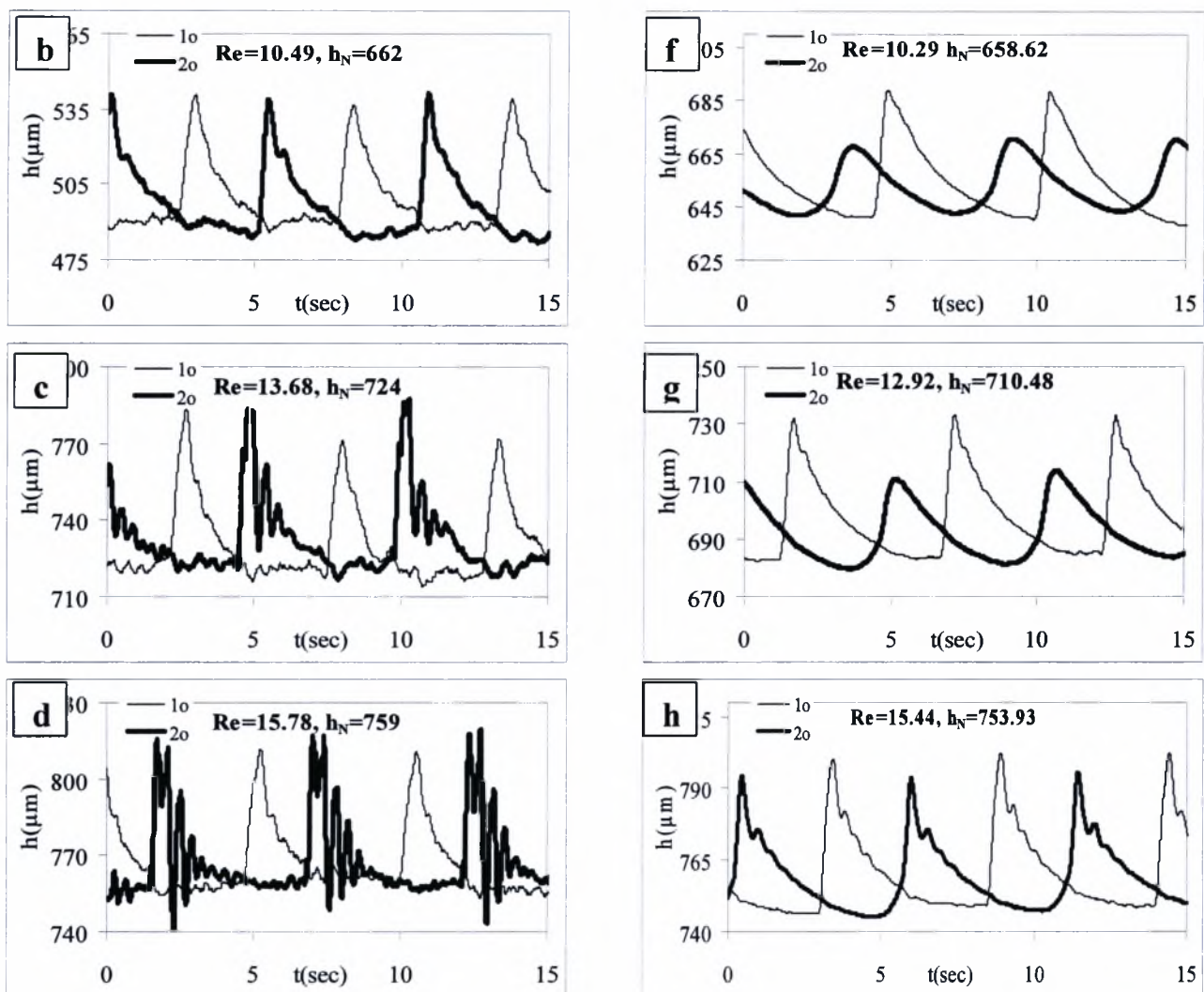
Σχήμα 4.15 Η εξάρτηση του $Re_{critical}$ από τη συχνότητα της διαταραχής για γωνία κλίσης $\varphi = 10^\circ$ και $\varphi = 15^\circ$ για το επίπεδο τοίχωμα.

Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται η εξάρτηση του $Re_{critical}$ από τη συχνότητα της διαταραχής για γωνία κλίσης $\varphi = 10^\circ$ και $\varphi = 15^\circ$ για το επίπεδο τοίχωμα. Παρατηρείται ότι για οποιαδήποτε συχνότητα και αν επιβάλλουμε ο κρίσιμος αριθμός μετάβασης παραμένει πρακτικά αμετάβλητος και για τις δύο κλίσεις του καναλιού.

4.5 Η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού Reynolds από το πλάτος του καναλιού στο επίπεδο τοίχωμα

Το πλάτος του καναλιού, θεωρητικά, δε θα έπρεπε να επηρεάζει τον κρίσιμο αριθμό Re για την μετάβαση από την ευστάθεια στην αστάθεια. Ωστόσο, όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχήματα, η μείωση του πλάτους του καναλιού επιδρά σταθεροποιητικά στη ροή υγρού υμένα. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τρία (3) διαφορετικά πλάτη καναλιού ($w=83,166,250\text{mm}$) και εφαρμόστηκαν παρεμφερείς συνθήκες ροής σε κάθε πλάτος καναλιού.

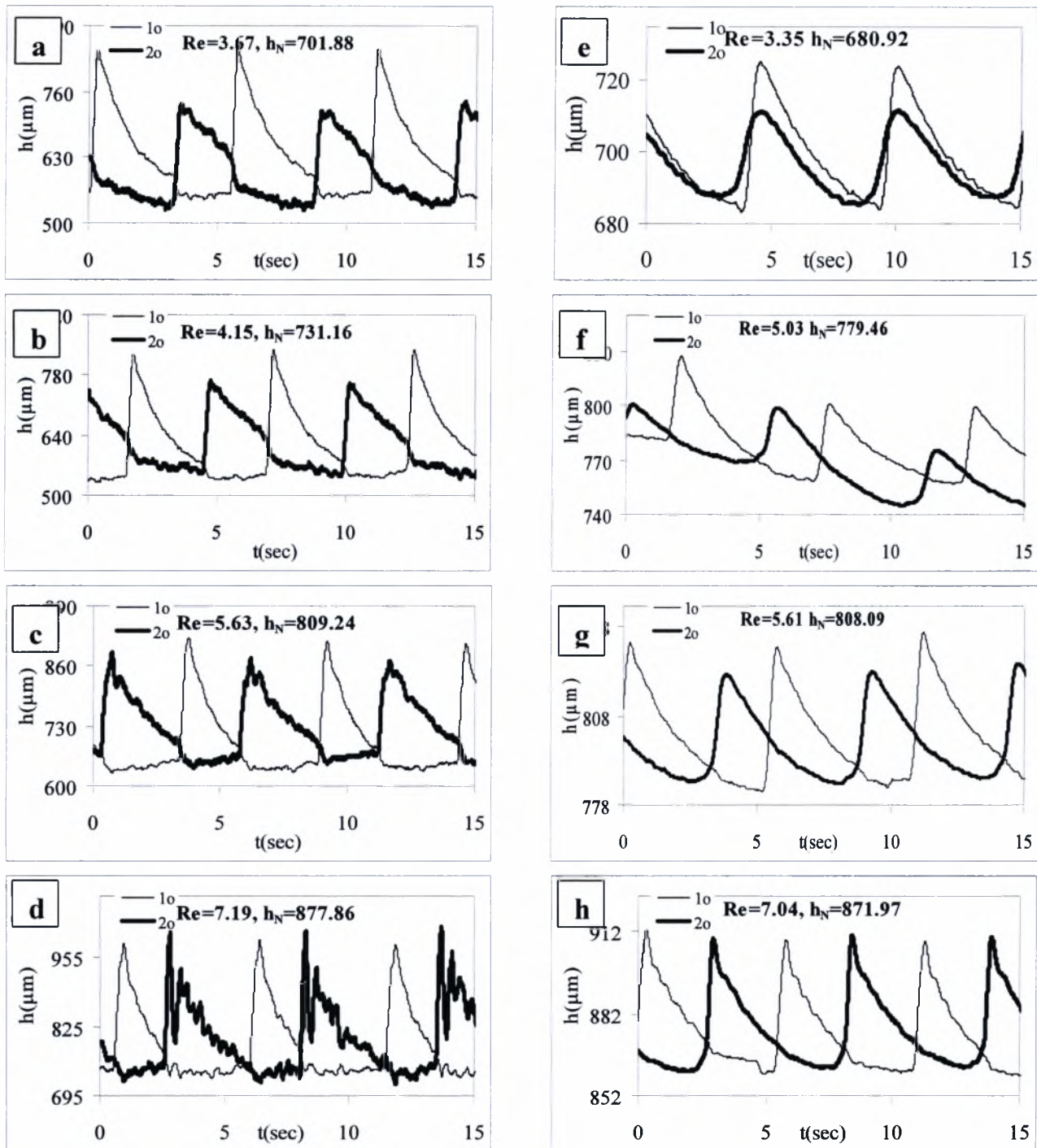




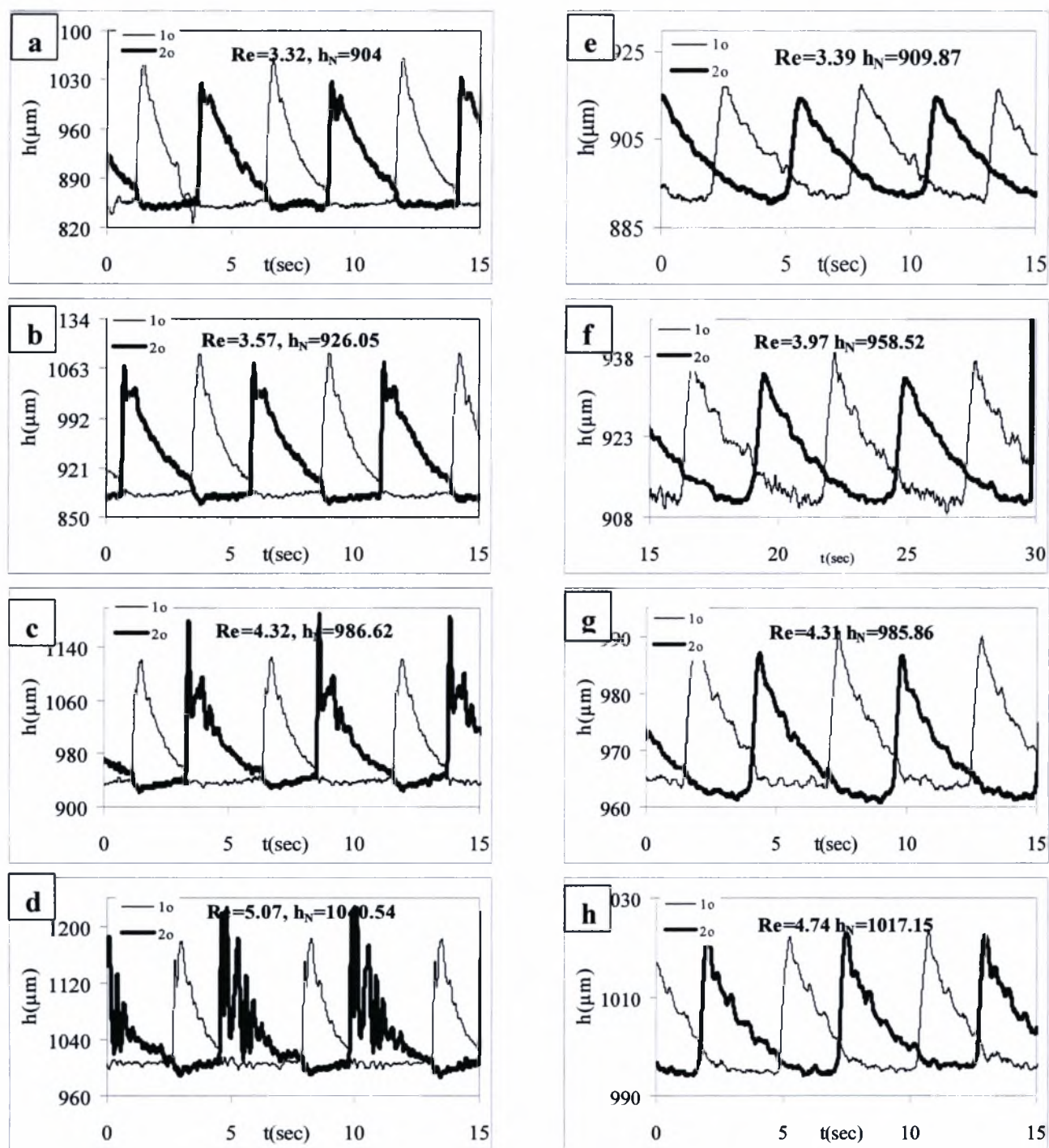
Σχήμα 4.16 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15\text{ cm}$ και $-x_o=65\text{ cm}$), για $\phi=7^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=250\text{mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re \approx 10.3$.

Στο σχήμα 4.15 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε παρεμφερείς συνθήκες σε δύο διαφορετικά πλάτη καναλιού. Στα διαγράμματα (a,b,c,d) αποτυπώνεται η μετάβαση του υγρού υμένα από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή για πλάτος καναλιού $w=250\text{mm}$ ενώ στα διαγράμματα (e,f,g,h) αποτυπώνεται η μετάβαση του υγρού υμένα από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή για πλάτος καναλιού $w=83\text{mm}$. Από τα διαγράμματα φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση της μείωσης του πλάτους καθώς σε παρεμφερείς αριθμούς Reynolds (≈ 10.3) στην περίπτωση που το πλάτος είναι 250 mm , ο υμένας έχει περάσει στην ασταθή περιοχή ενώ στην περίπτωση όπου το πλάτος είναι 83mm ο υμένα βρίσκεται στην ευσταθή περιοχή.

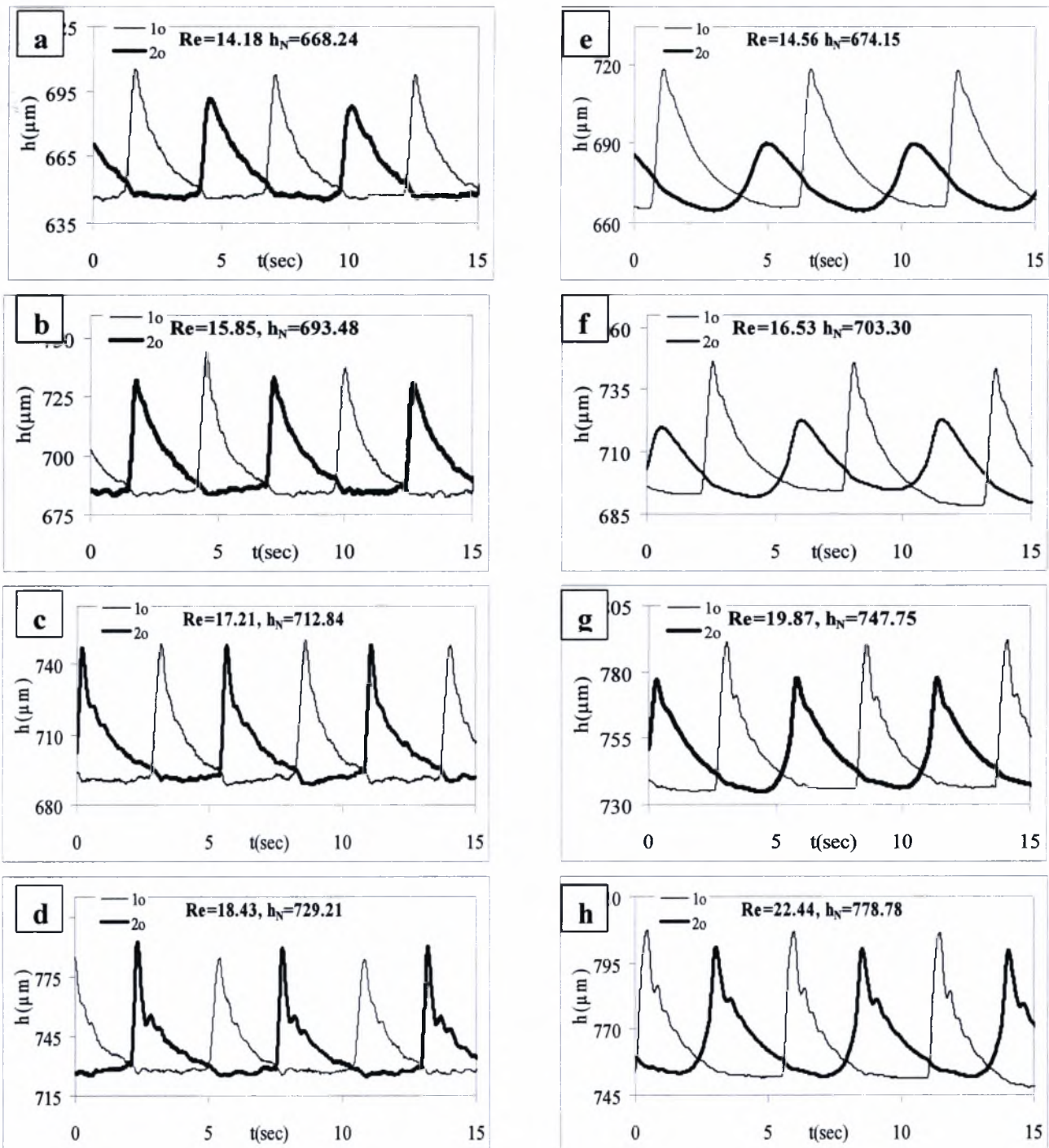
Καθ' όμοιο τρόπο αναλύονται όλα τα παρακάτω σχήματα και σε όλα φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση της μείωσης του πλάτους του καναλιού.



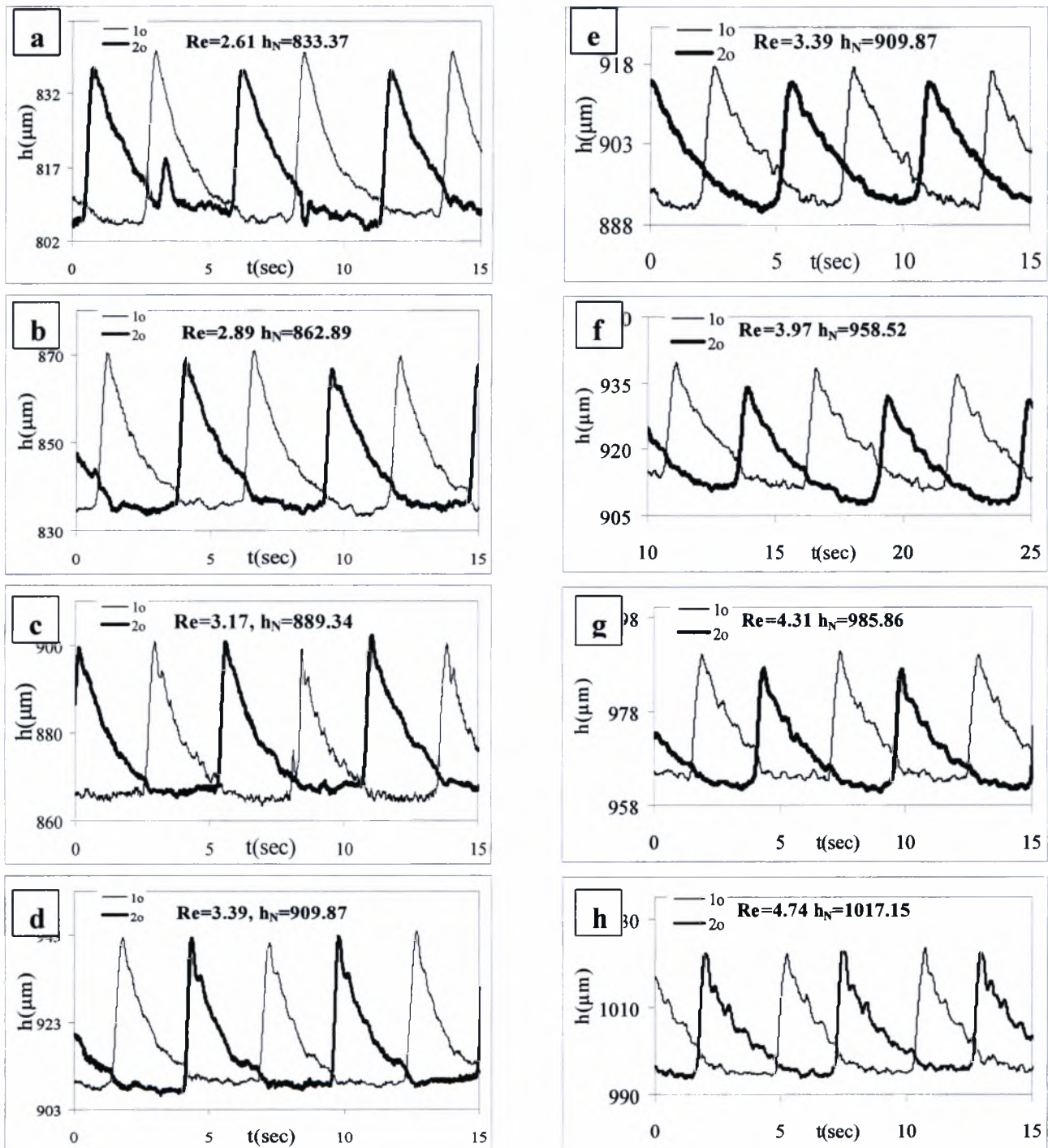
Σχήμα 4.17 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15\text{ cm}$ και $-x_o=65\text{ cm}$), για $\varphi=10^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=250\text{mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re\approx 7.1$.



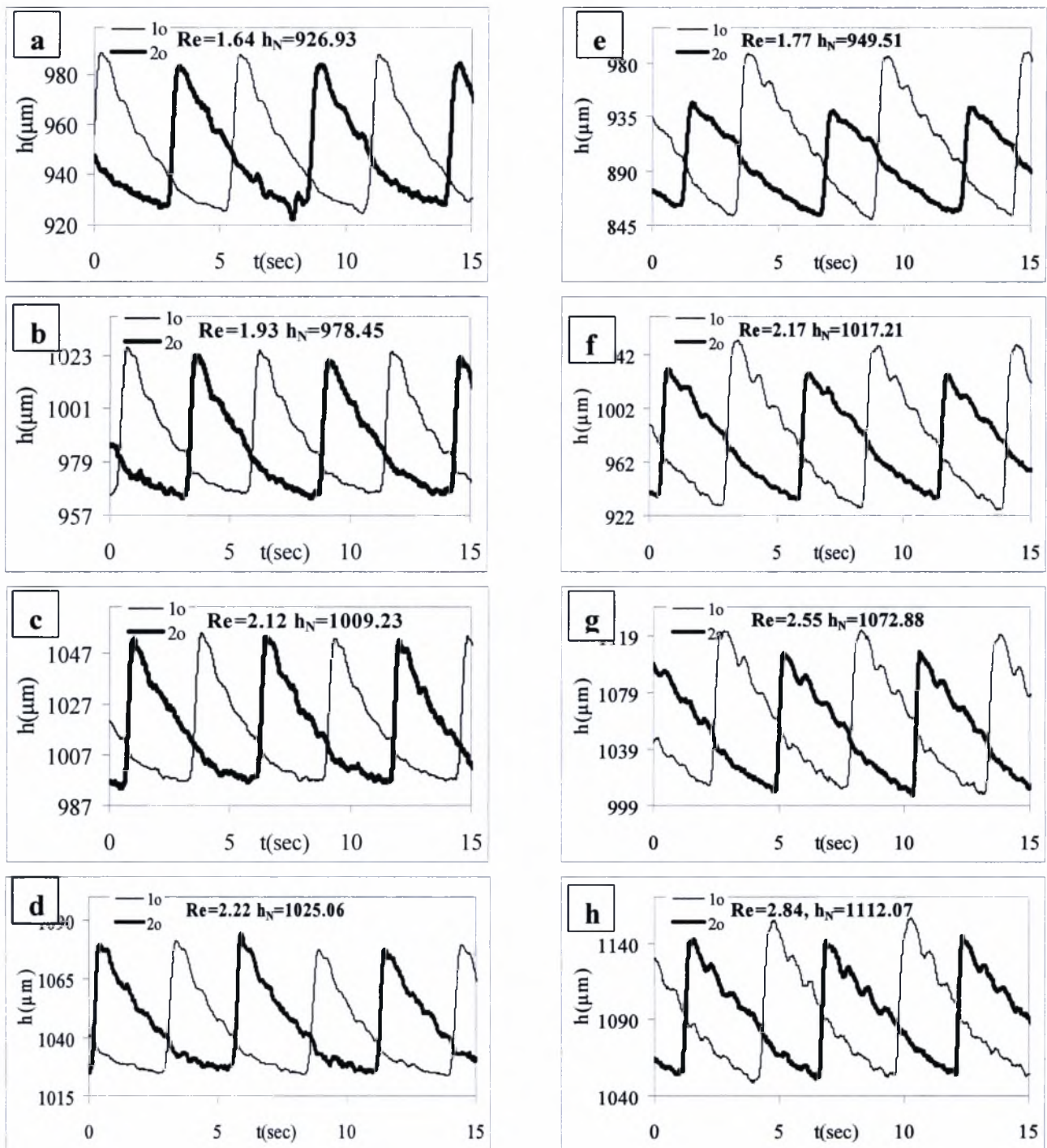
Σχήμα 4.18 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15\text{ cm}$ και $-x_o=65\text{ cm}$), για $\phi=15^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=250\text{mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re \approx 4.3$.



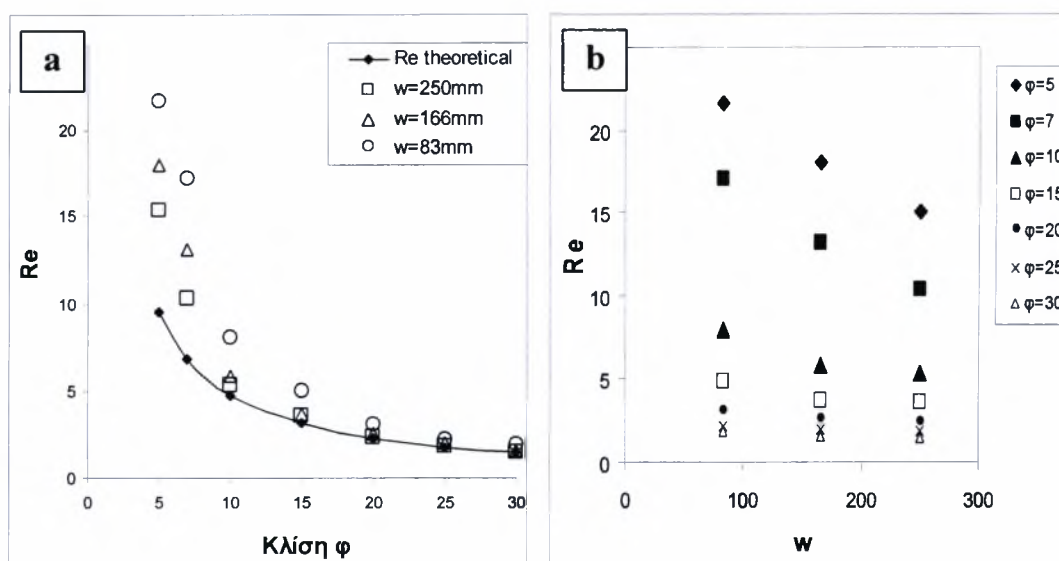
Σχήμα 4.19 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15\text{ cm}$ και $-x_o=65\text{ cm}$), για $\varphi=5^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=166\text{mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re\approx 17$.



Σχήμα 4.20 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15 \text{ cm}$ και $-x_0=65 \text{ cm}$), για $\varphi=15^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=166\text{mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re \approx 4.0$.



Σχήμα 4.21 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_o, y_o, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_o=15\text{ cm}$ και $-x_o=65\text{ cm}$), για $\varphi=20^\circ$ και για δύο διαφορετικά πλάτη του καναλιού $w=166\text{mm}$ (a,b,c,d) & $w=83\text{mm}$ (e,f,g,h). Φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους π.χ για $Re \approx 2.2$.



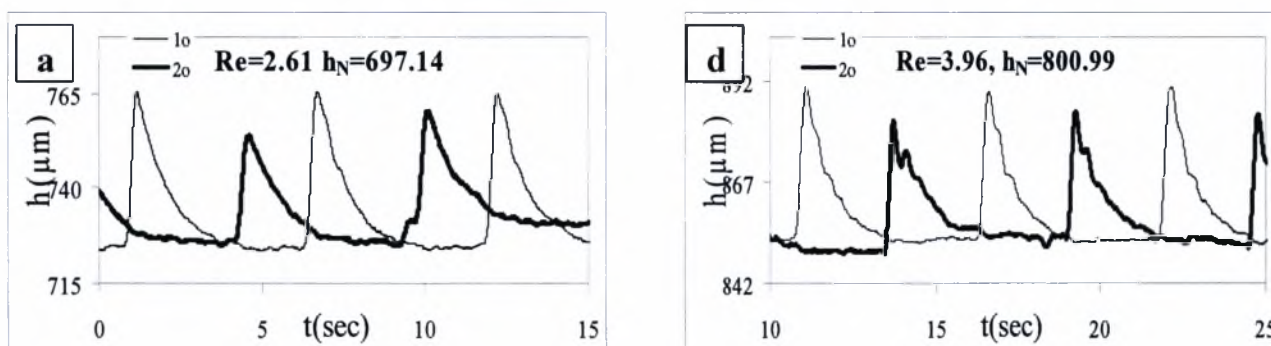
Σχήμα 4.22. Η εξάρτηση του κρίσιμου Re από το πλάτος του καναλιού α) Ο κρίσιμος Re συναρτῆσει της γωνίας κλίσης β) Ο κρίσιμος Re συναρτῆσει του πλάτους του καναλιού

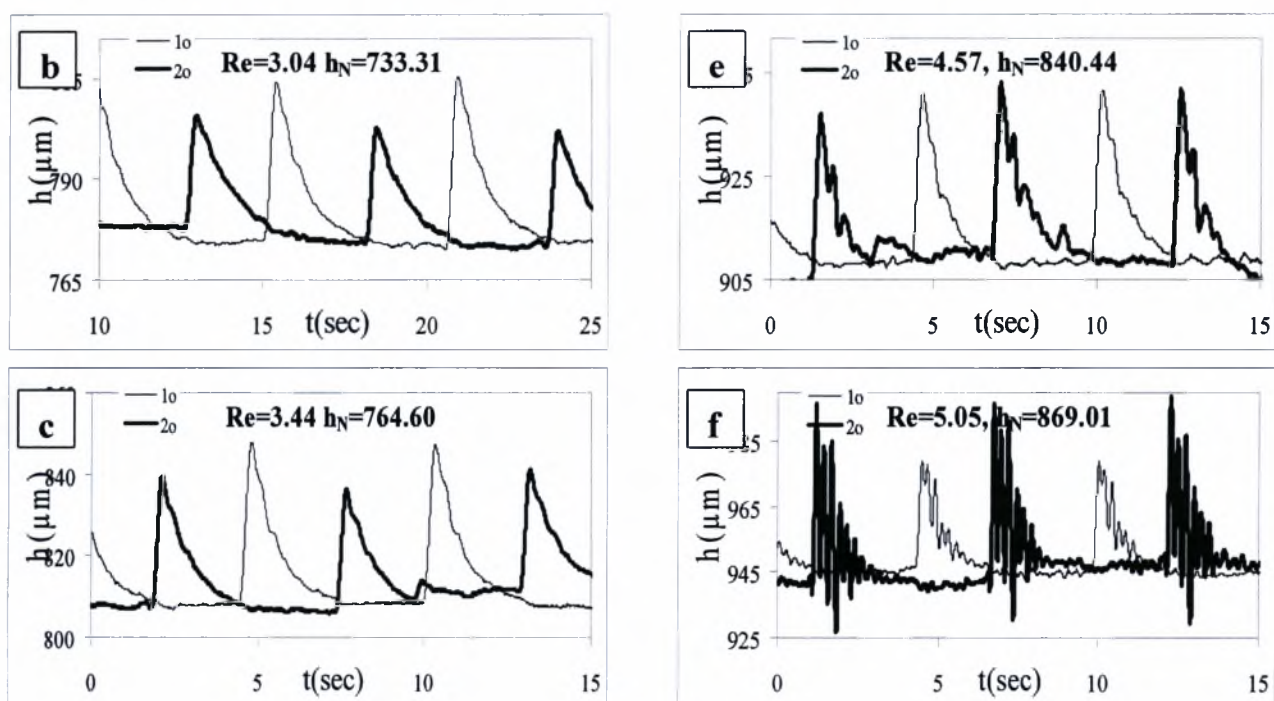
Στο σχήμα 4.22 φαίνεται ξεκάθαρα η σταθεροποιητική δράση του πλάτους του καναλιού καθώς αυτό μειώνεται. Παρατηρούμε ότι για μικρές γωνίες κλίσης η διαφορά μεταξύ των θεωρητικών τιμών και των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι μεγάλη. Όσο η γωνία κλίσης αυξάνεται οι πειραματικές τιμές των μετρήσεων τείνουν σε αυτές της θεωρητικής πρόβλεψης.

4.6 Επίδραση τοιχώματος στην ευστάθεια του υγρού υμένα

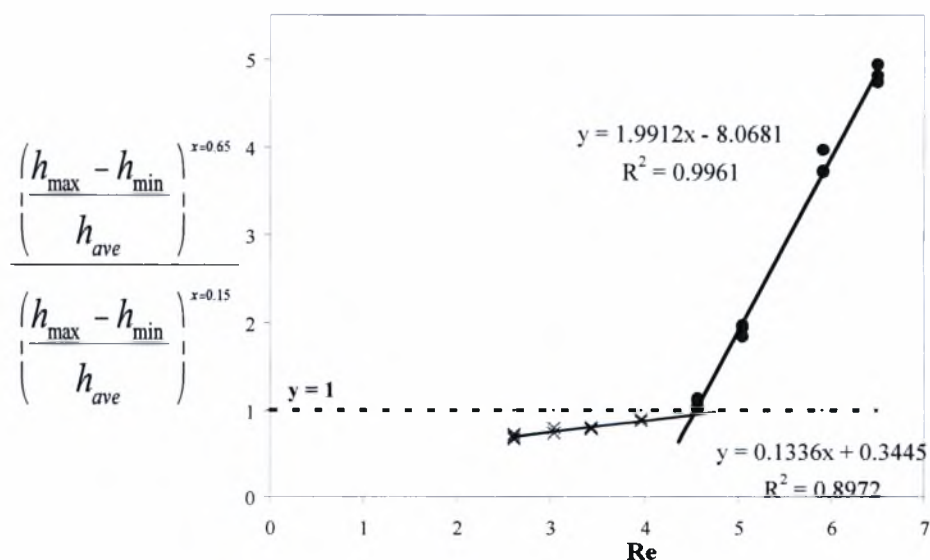
Πέραν από τη μελέτη ευστάθειας του υγρού υμένα σε επίπεδο τοίχωμα, κρίθηκε σκόπιμη και η μελέτη της ευστάθειας του υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένα τοιχώματα. Οι μέχρι τώρα έρευνες είναι ελάχιστες για την ανάλυση ευστάθειας σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα αν και βρίσκει εφαρμογή σε πολλαπλές διεργασίες σε σχέση με τις εφαρμογές του επίπεδου τοιχώματος.

4.6.1 Ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=2\text{mm}$ $2b=1\text{ mm}$





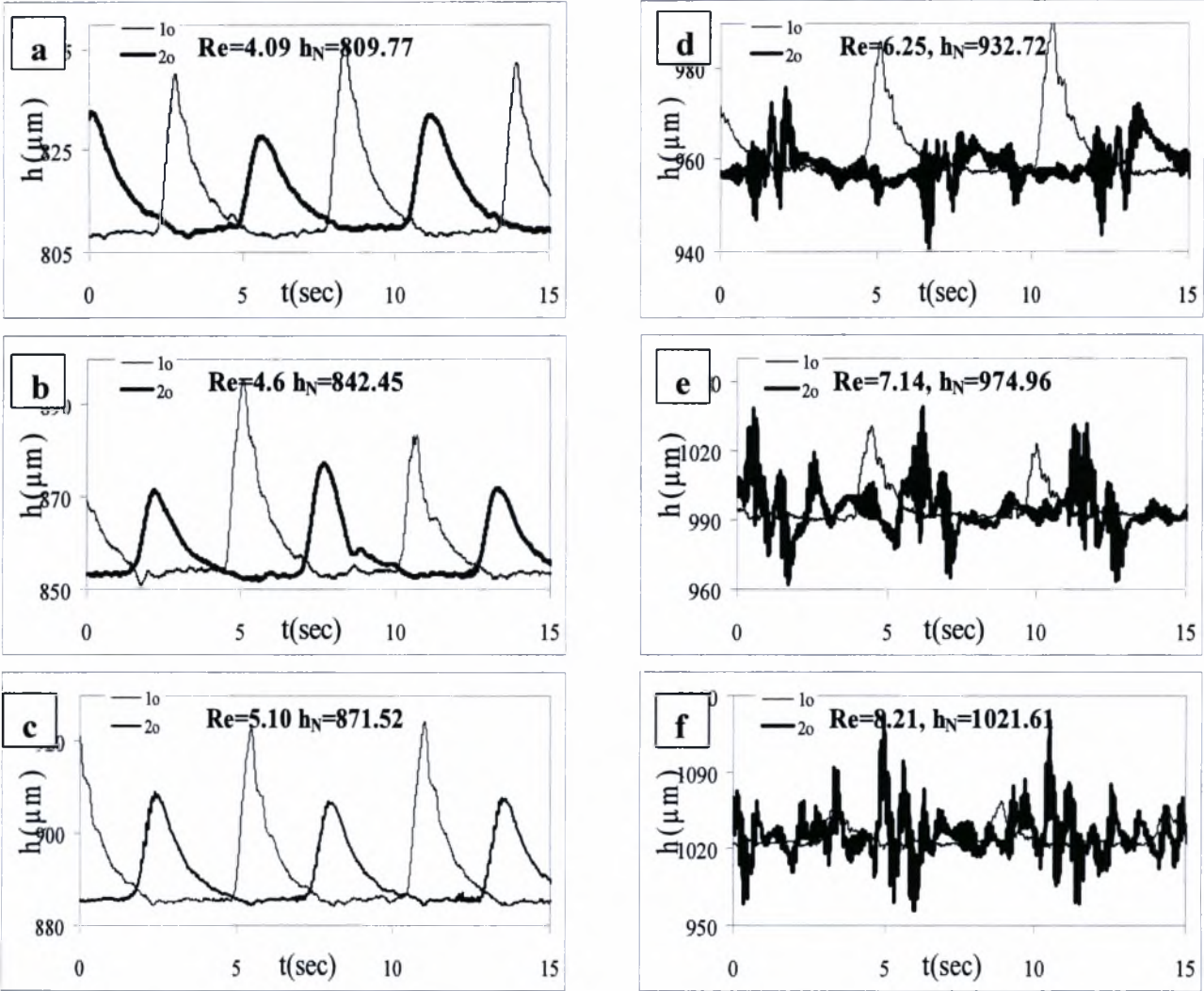
Σχήμα 4.23 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\phi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 2,61$, b) $Re = 3,04$, c) $Re = 3,44$, d) $Re = 3,96$, e) $Re = 4,57$, f) $Re = 5,05$



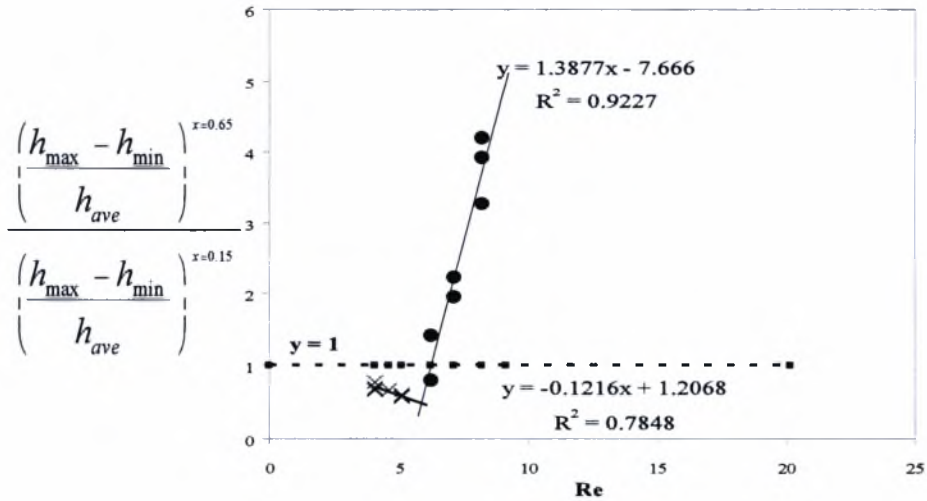
Σχήμα 4.24 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\phi=15^\circ$ και $w=250$ mm σε ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=2$ mm $2b=1$ mm.

Με βάση τη μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds από την τομή της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή ευστάθειας ισούται με 4.57. Αν χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο τομής της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή $y=1$ ο αριθμός μετάβασης είναι ίσος με 4.53.

4.6.2 Ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης L=12mm 2b=2mm



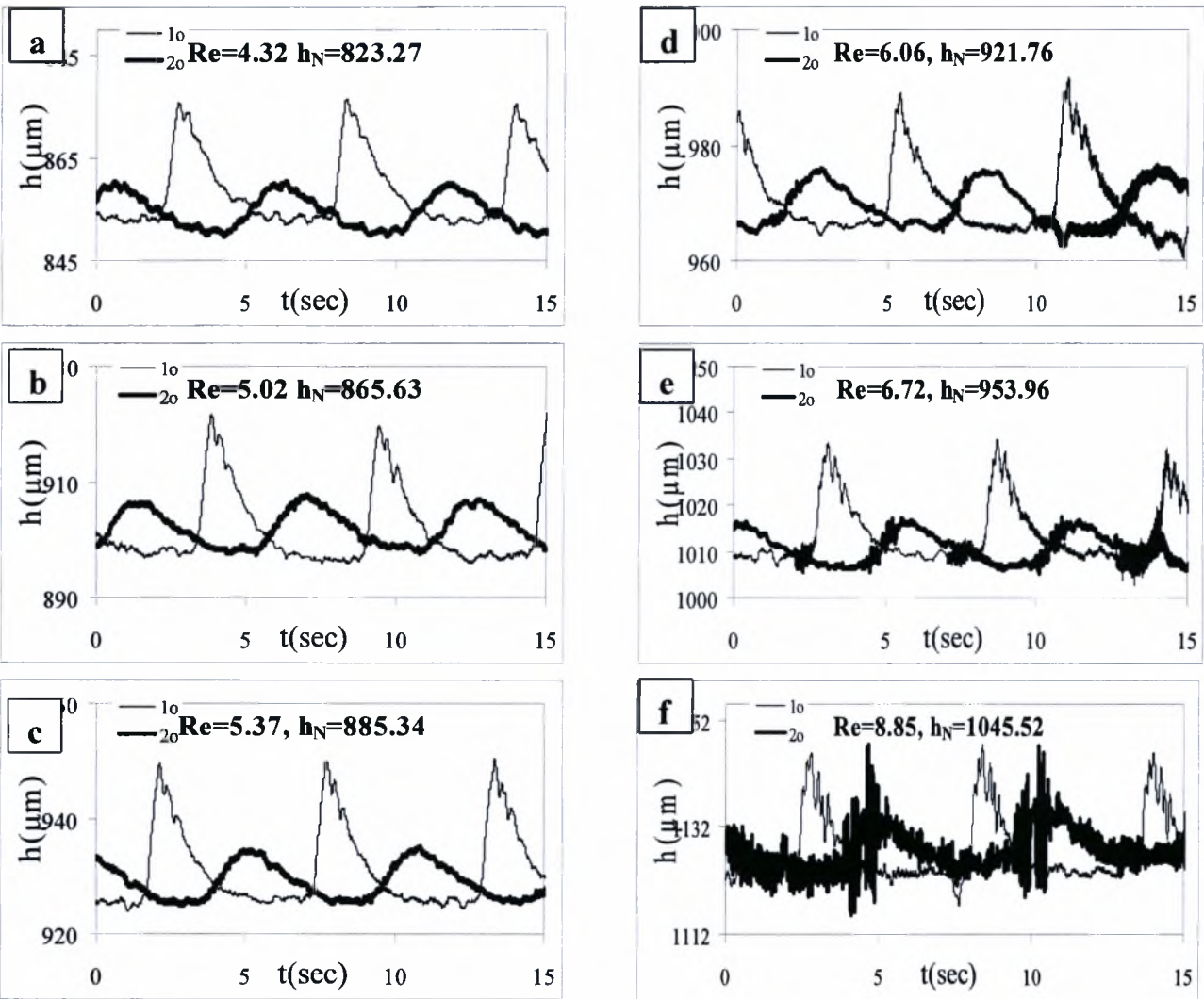
Σχήμα 4.25 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re : a) $Re = 4.09$, b) $Re= 4.6$, c) $Re= 5.10$, d) $Re= 6.25$, e) $Re= 7.14$, f) $Re=8.21$



Σχήμα 4.26 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=250$ mm σε ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης L=12mm 2b=2 mm

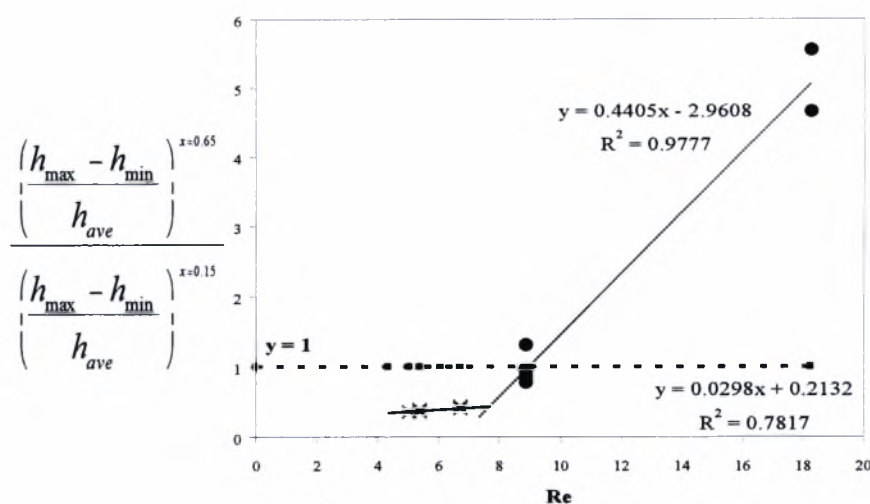
Με βάση τη μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds από την τομή της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή ευστάθειας ισούται με 5.87. Αν χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο τομής της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή $y=1$ ο αριθμός μετάβασης είναι ίσος με 6.24

4.6.3 Ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=50\text{mm}$ $2b=10\text{mm}$



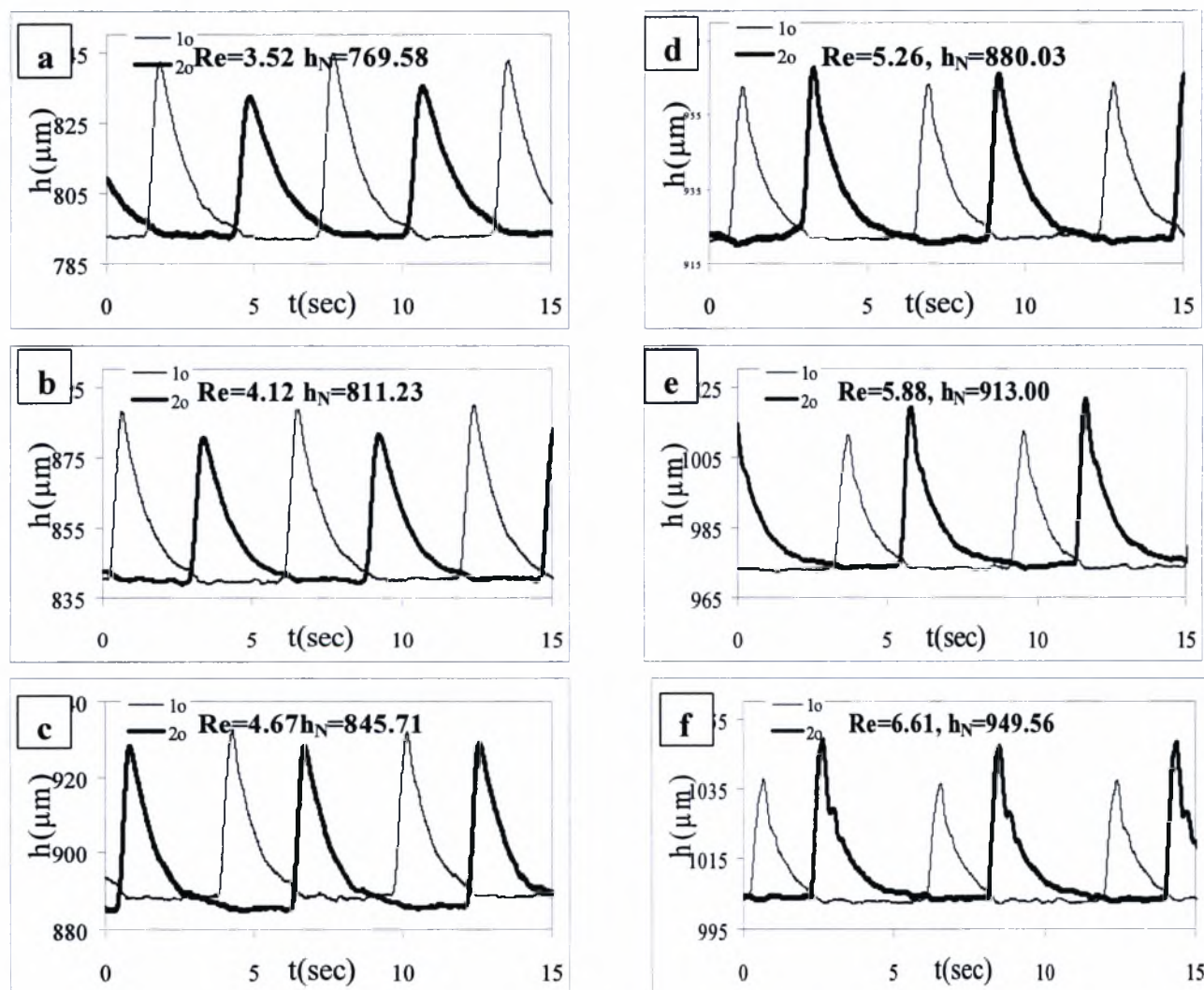
Σχήμα 4.27 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{mm}$ και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $\text{Re} = 4.32$, b) $\text{Re} = 5.02$, c) $\text{Re} = 5.37$, d) $\text{Re} = 6.06$, e) $\text{Re} = 6.72$, f) $\text{Re} = 8.85$

Με βάση τη μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds από την τομή της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή ευστάθειας ισούται με 7.72. Αν χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο τομής της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή $y=1$ ο αριθμός μετάβασης είναι ίσος με 8.99

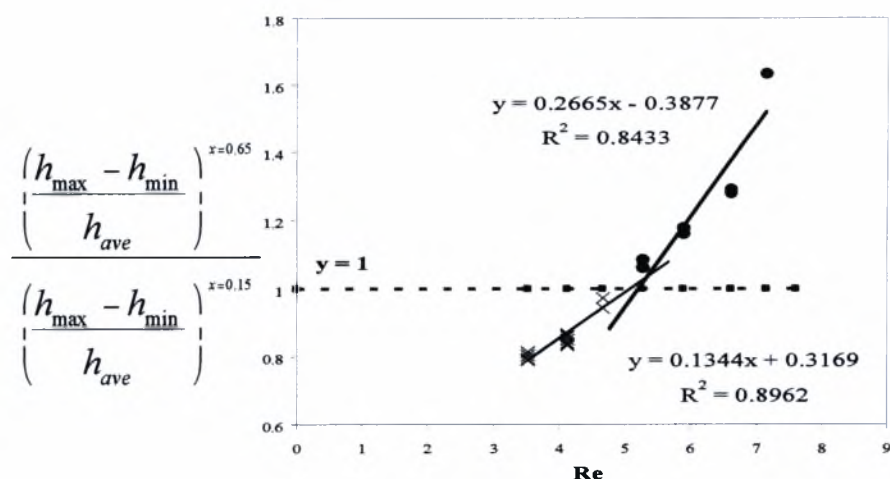


Σχήμα 4.28 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\phi=15^\circ$ και $w=250\text{mm}$ σε ημιτονοειδές τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=50\text{mm}$ $2b=10\text{mm}$

4.6.4 Τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12\text{mm}$ $2b=0.2\text{mm}$



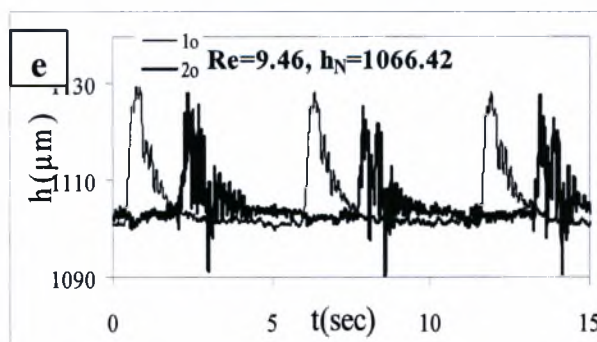
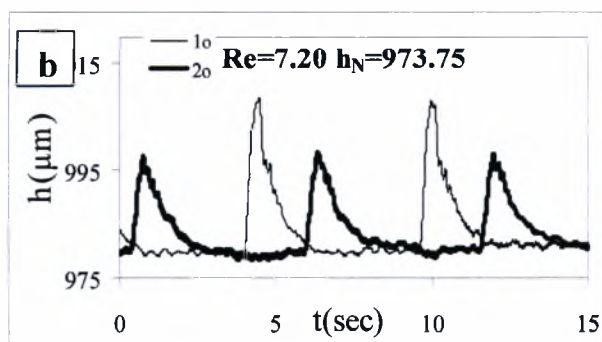
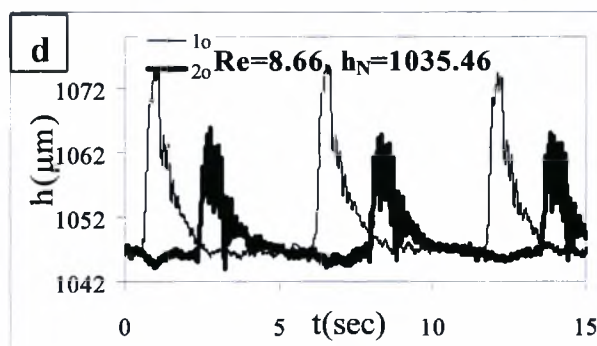
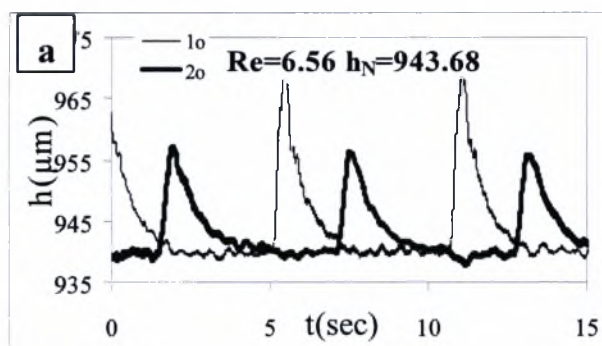
Σχήμα 4.29 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\phi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{mm}$ και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $\text{Re} = 3.52$, b) $\text{Re} = 4.12$, c) $\text{Re} = 4.67$, d) $\text{Re} = 5.26$, e) $\text{Re} = 5.88$, f) $\text{Re} = 6.61$

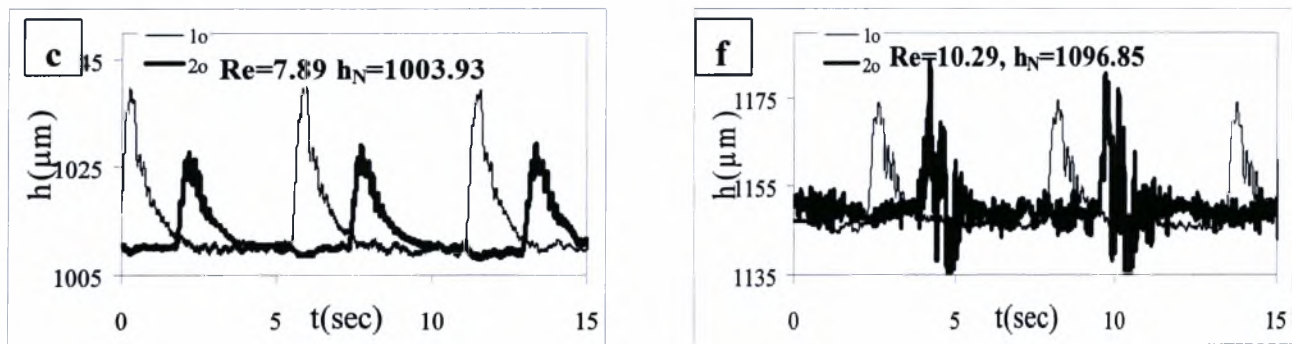


Σχήμα 4.30 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\phi=15^\circ$ και $w=250\text{mm}$ σε τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12\text{mm}$ $2b=0.2\text{mm}$

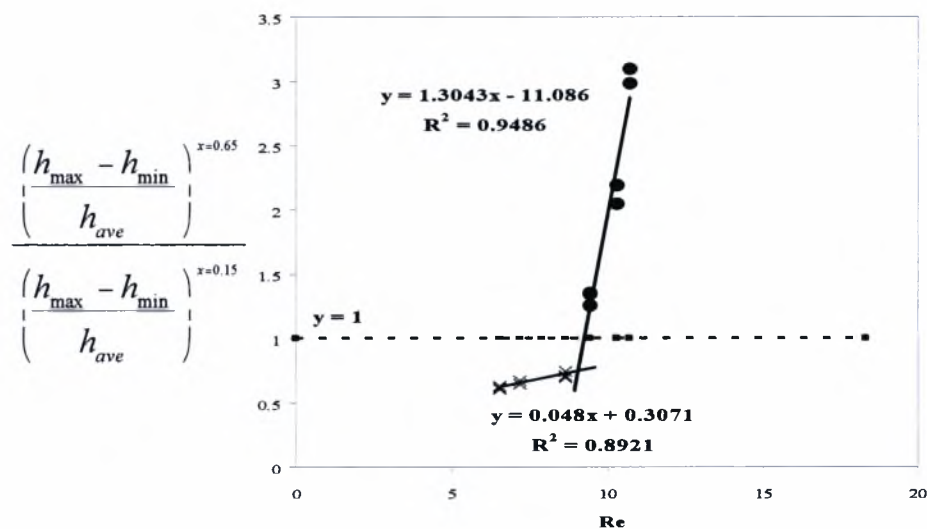
Με βάση τη μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds από την τομή της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή ευστάθειας ισούται με 5.33. Αν χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο τομής της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή $y=1$ ο αριθμός μετάβασης είναι ίσος με 5.20

4.6.5 Τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12\text{mm}$ $2b=0.8\text{mm}$





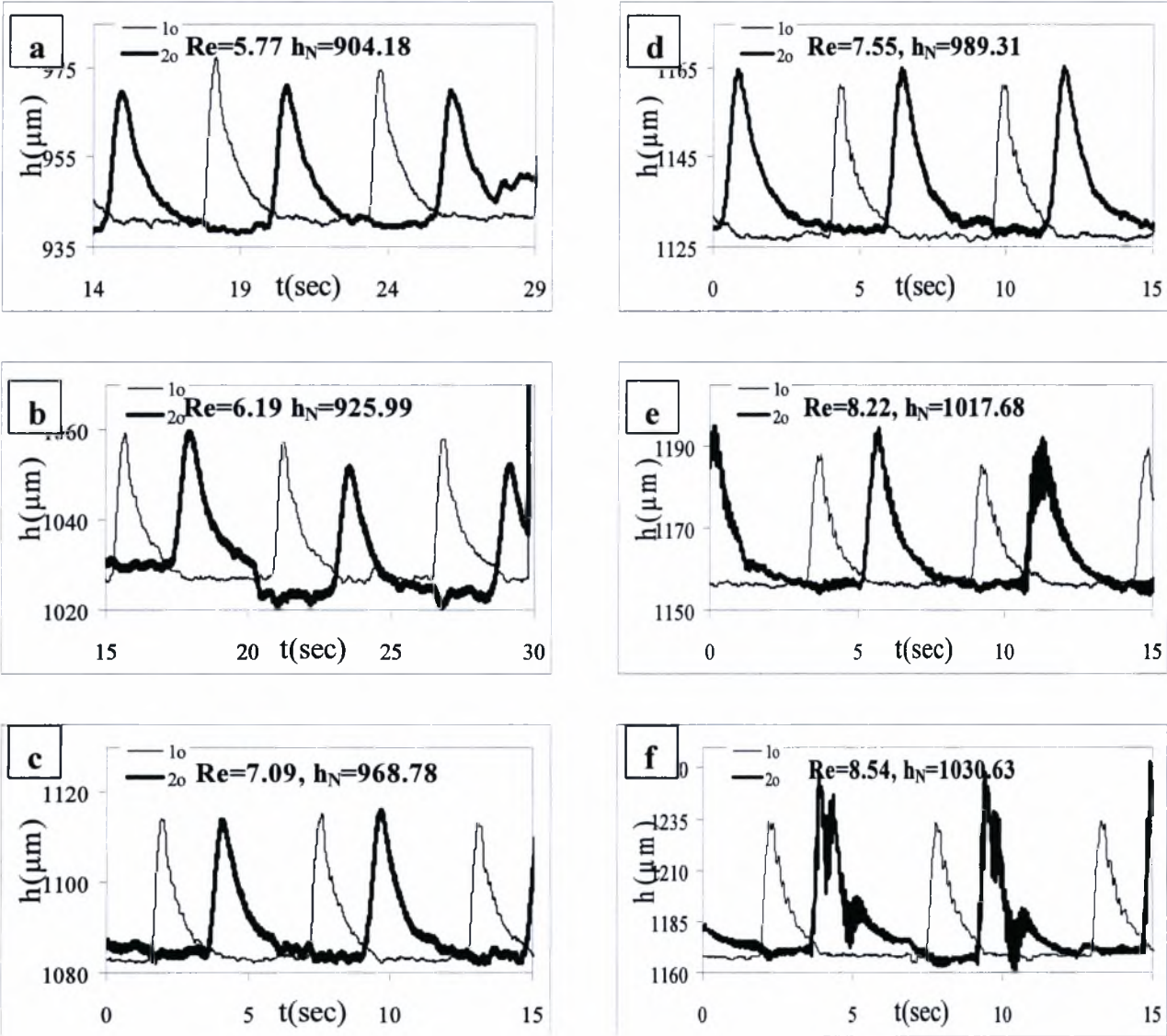
Σχήμα 4.31 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\phi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) $Re = 6.56$, b) $Re = 7.20$, c) $Re = 7.89$, d) $Re = 8.66$, e) $Re = 9.46$, f) $Re = 10.29$



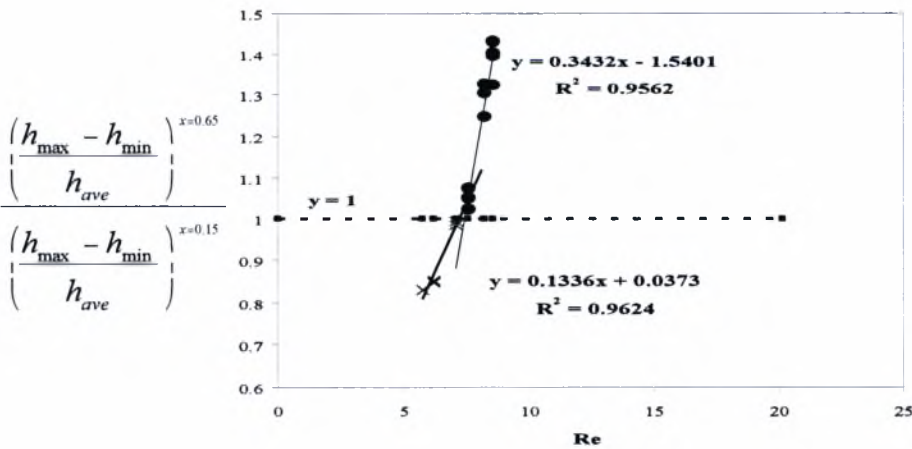
Σχήμα 4.32 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\phi=15^\circ$ και $w=250$ mm σε τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12$ mm $2b=0.8$ mm

Με βάση τη μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds από την τομή της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή ευστάθειας ισούνται με 9.06. Αν χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο τομής της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή $y=1$ ο αριθμός μετάβασης είναι ίσος με 9.26

4.6.6 Τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης L=20mm 2b=2mm



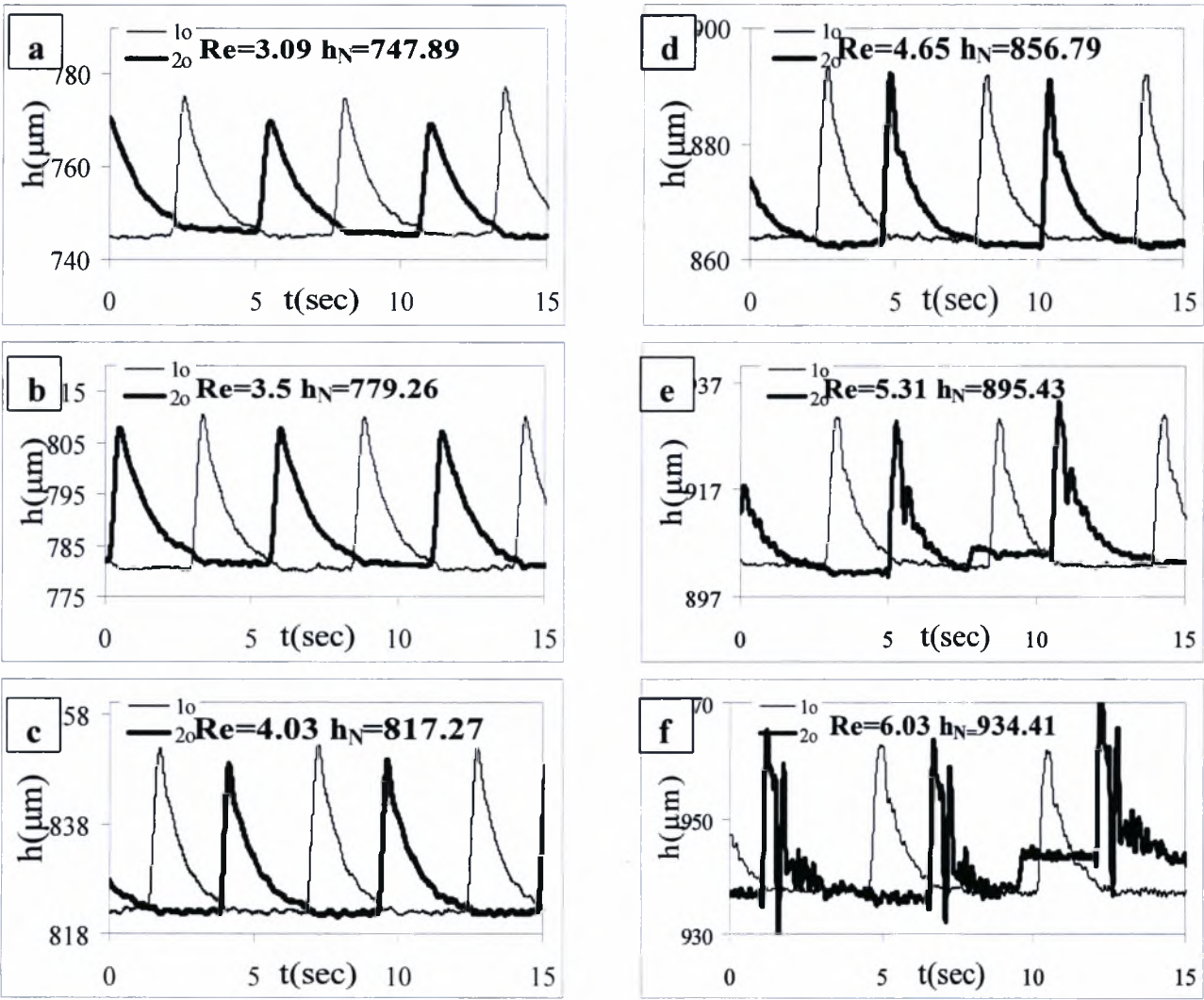
Σχήμα 4.33 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm και για τους παρακάτω αριθμούς Re : a) $Re = 5.77$, b) $Re = 6.19$, c) $Re = 7.09$, d) $Re=7.55$, e) $Re=8.22$, f) $Re=8.54$



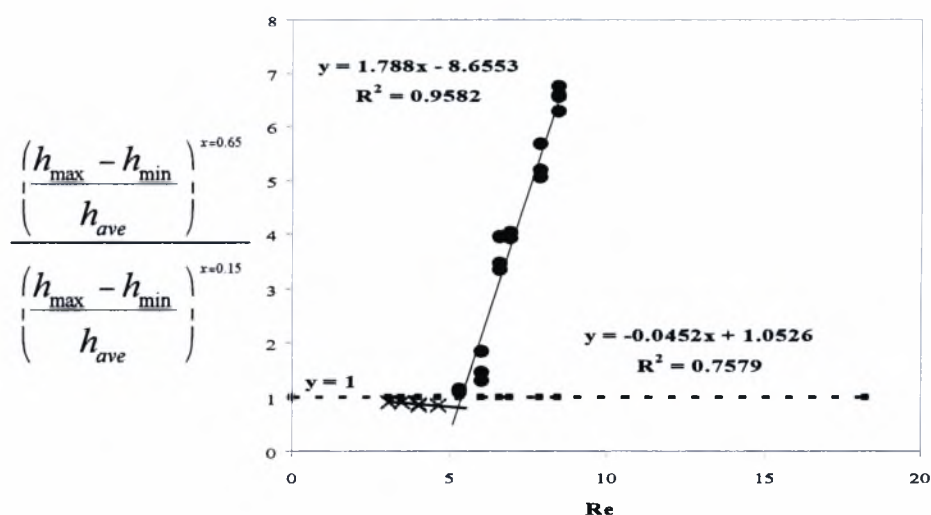
Σχήμα 4.34 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=250$ mm σε τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=20$ mm $2b=2$ mm

Με βάση τη μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds από την τομή της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή ευστάθειας ισούνται με 7.52. Αν χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο τομής της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή $y=1$ ο αριθμός μετάβασης είναι ίσος με 7.4

4.6.7 Τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=24\text{mm}$ $2b=0.2\text{mm}$



Σχήμα 4.35 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0,y_0,t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{cm}$), για διάλυμα 62% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250\text{mm}$ και για τους παρακάτω αριθμούς Re : a) $Re = 3.09$, b) $Re = 3.50$, c) $Re = 4.03$, d) $Re=4.65$, e) $Re=5.31$, f) $Re=6.03$

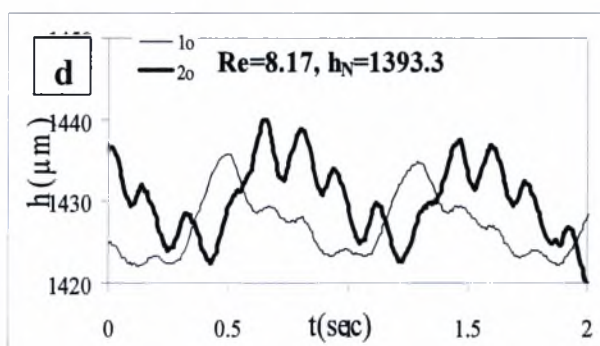
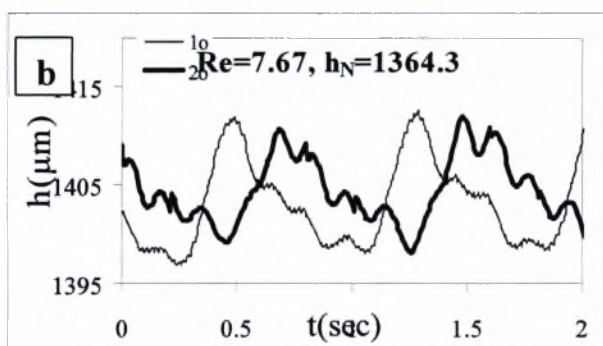
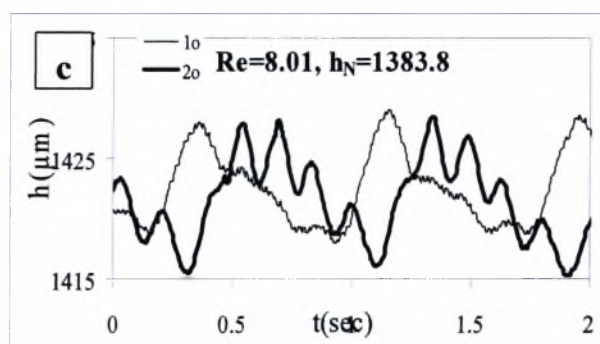
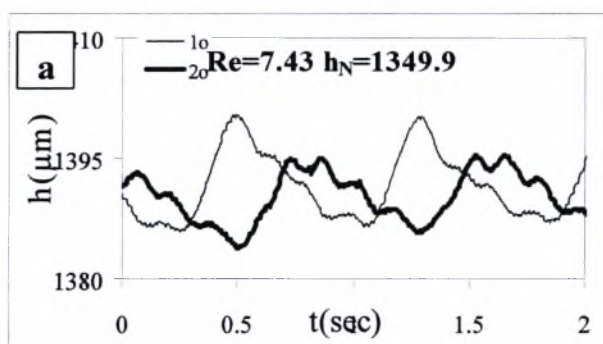


Σχήμα 4.36 Η μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds για $\varphi=15^\circ$ και $w=250\text{mm}$ σε τετραγωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=24\text{mm}$ $2b=0.2\text{mm}$

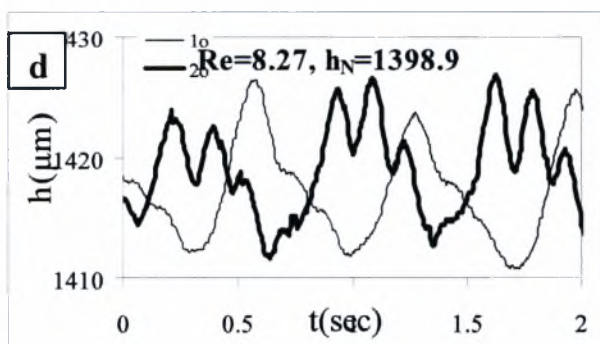
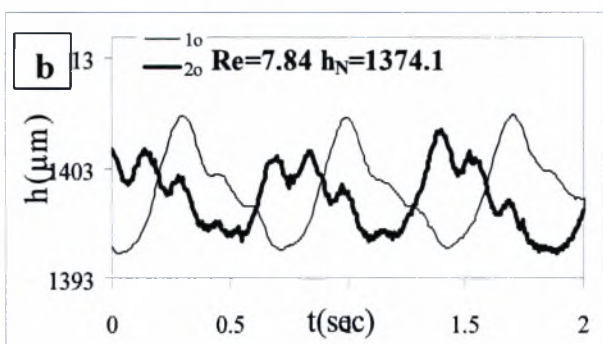
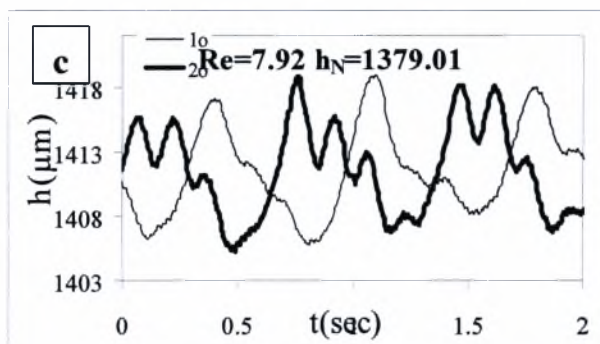
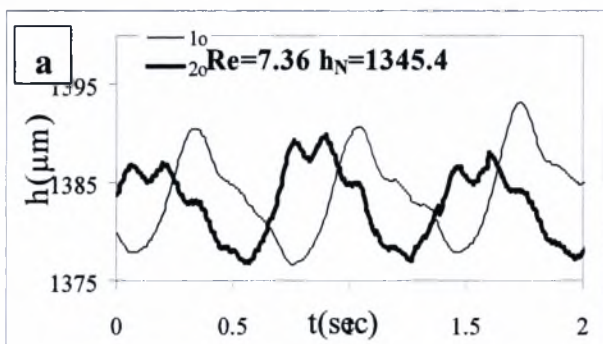
Με βάση τη μεθοδολογία εύρεσης του κρίσιμου αριθμού Reynolds από την τομή της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή ευστάθειας ισούται με 5.29. Αν χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο τομής της γραμμής αστάθειας με τη γραμμή $y=1$ ο αριθμός μετάβασης είναι ίσος με 5.40

4.7 Επίδραση της συχνότητας διαταραχής στην ευστάθεια του υγρού υμένα στο ορθογωνικό τοίχωμα χαρακτηριστικών $L=12\text{mm}$ $2b=0.8\text{mm}$

Η πλειοψηφία των προηγούμενων πειραματικών μετρήσεων έγινε με μία μόνο τιμή της συχνότητας της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Στην παρούσα παράγραφο εξετάζουμε την επίδραση της συχνότητας της διαταραχής στην ευστάθεια του υγρού υμένα. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δύο διαφορετικές τιμές κλίσης του καναλιού της ροής $\varphi=10^\circ$ και $\varphi=15^\circ$ και σε δύο διαφορετικά τοιχώματα. Το ένα ήταν το επίπεδο τοίχωμα και το άλλο ήταν ο ορθογωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12\text{mm}$ $2b=0.8\text{mm}$. Οι τιμές της συχνότητας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: $f=2\text{ Hz}$, $f=1.75\text{ Hz}$, $f=1.49\text{ Hz}$, $f=1.25\text{ Hz}$, $f=1\text{ Hz}$, $f=0.74\text{ Hz}$, $f=0.5\text{ Hz}$ και $f=0.25\text{ Hz}$. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.



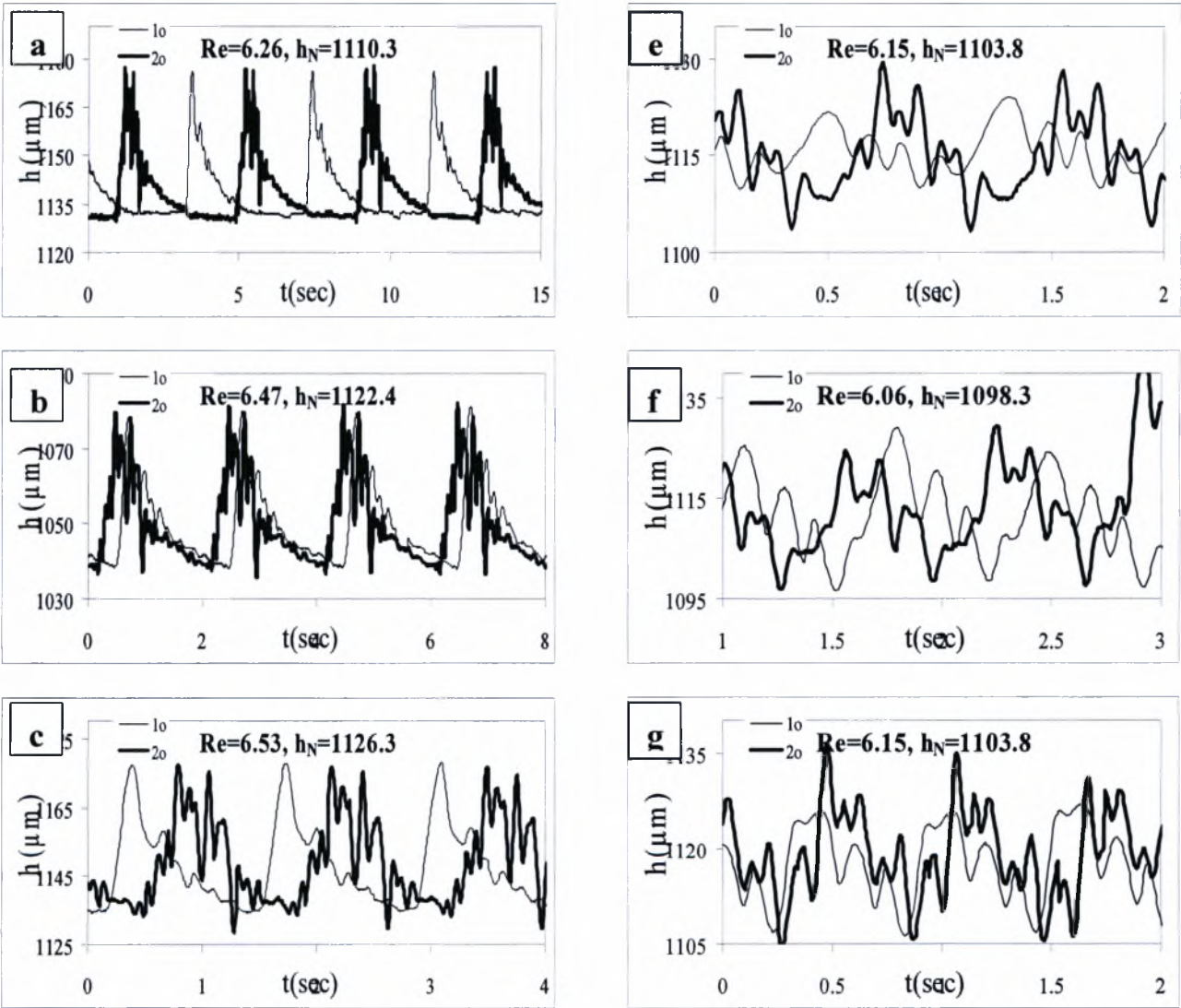
Σχήμα 4.37 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm, συχνότητας διαταραχής $f=1.25$ Hz για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) Re = 7.43, b) Re= 7.67, c) Re= 8.01, d) Re=8.17

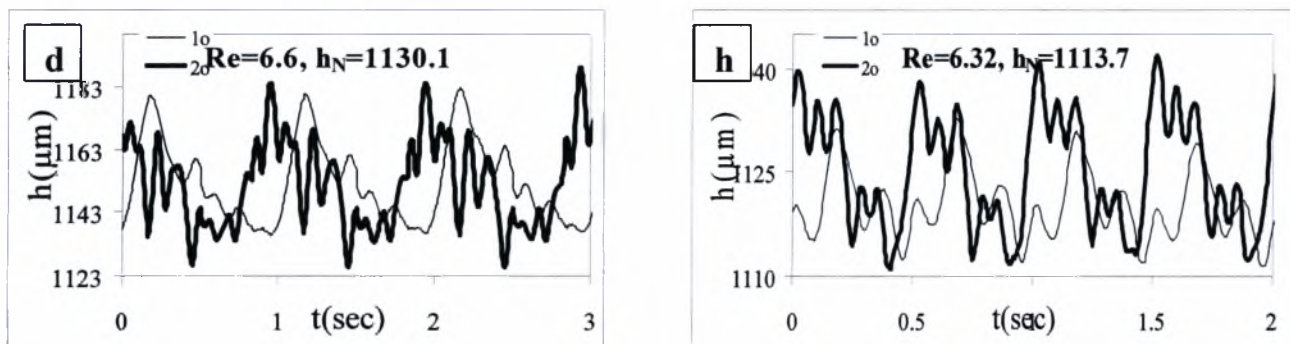


Σχήμα 4.38 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=10^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm, συχνότητας διαταραχής $f=1.5$ Hz για τους παρακάτω αριθμούς Re: a) Re = 7.36, b) Re= 7.84, c) Re= 7.92, d) Re=8.2

Τα παραπάνω σχήματα δείχνουν τη χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δύο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15\text{ cm}$ και $-x_0=65\text{ cm}$), για τις ίδιες συνθήκες με μόνη διαφορά τη συχνότητα της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή γίνεται σε περίπου ίδιους αριθμούς Reynolds. ($Re_{crit} \approx 7.6$)

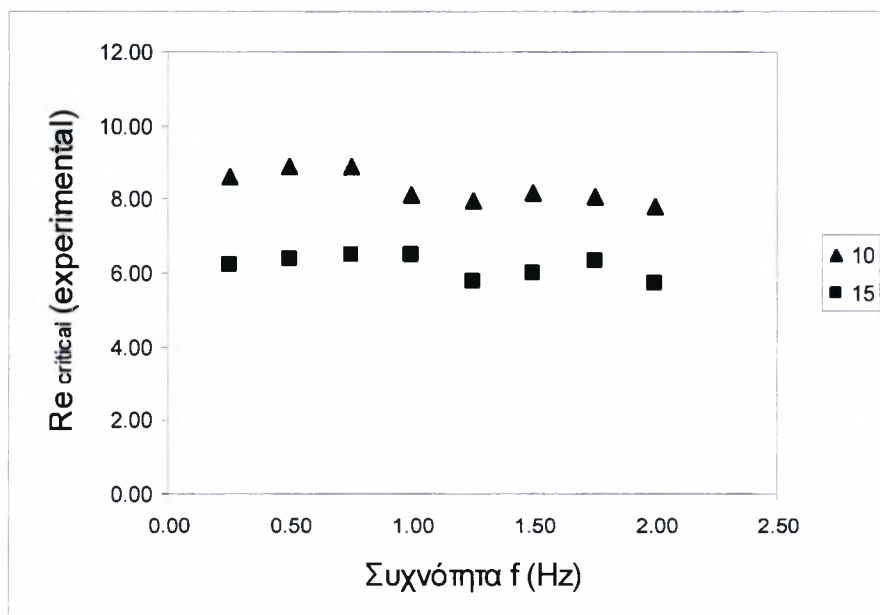
Πιο κάτω παρατίθενται διαγράμματα τα οποία αντιστοιχούν στην περιοχή αστάθειας του υμένα για όλες τις συχνότητες διαταραχής σε γωνία κλίσης του καναλιού ίση με $\varphi=15^\circ$.





Σχήμα 4.39 Η χρονική εξέλιξη του πάχους του υμένα $h(x_0, y_0, t)$ σε δυο θέσεις κατάντη της ροής ($-x_0=15$ cm και $-x_0=65$ cm), για διάλυμα 66% κ.β. γλυκερίνης, σε γωνία κλίσης του τοιχώματος ίση με $\varphi=15^\circ$, για πλάτος τοιχώματος ίσο με $w=250$ mm με συχνότητες διαταραχής : a) $f=0.25$ Hz , b) $f=0.5$ Hz , c) $f=0.75$ Hz, d) $f=1$ Hz, e) $f=1.25$ Hz, f) $f=1.5$ Hz, g) $f=1.75$ Hz και h) $f=2$ Hz

Από το σχήμα 4.39 παρατηρούμε ότι η αστάθεια λαμβάνει χώρα στον ίδιο περίπου αριθμό Reynolds ($Re_{crit} \approx 6$). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η συχνότητα της επιβαλλόμενης διαταραχής δεν επηρεάζει τον κρίσιμο αριθμό μετάβασης.



Σχήμα 4.40 Η εξάρτηση του $Re_{critical}$ από τη συχνότητα της διαταραχής για γωνία κλίσης $\varphi=10^\circ$ και $\varphi=15^\circ$ για το ορθογωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12$ mm $2b=0.8$ mm.

Στο σχήμα 4.40 παρουσιάζεται η εξάρτηση του $Re_{critical}$ από τη συχνότητα της διαταραχής για γωνία κλίσης $\varphi=10^\circ$ και $\varphi=15^\circ$ για το ορθογωνικό τοίχωμα με χαρακτηριστικά διαμόρφωσης $L=12$ mm $2b=0.8$ mm. Παρατηρείται ότι για οποιαδήποτε συχνότητα και αν επιβάλλουμε ο κρίσιμος αριθμός μετάβασης παραμένει πρακτικά αμετάβλητος και για τις δύο κλίσεις του καναλιού.

4.8 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα από τις πειραματικές μετρήσεις σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Όλες οι μετρήσεις έγιναν σε γωνία κλίσης $\varphi=15^\circ$ και πλάτος καναλιού $w=250\text{mm}$. Στον πίνακα περιλαμβάνεται ο κρίσιμος αριθμός Reynolds (όπως έχει προκύψει από την ανάλυση ευστάθειας), τα χαρακτηριστικά διαμόρφωσης του τοιχώματος (ύψος και πλάτος) καθώς επίσης και το είδος του τοιχώματος. Δίνεται τέλος και οι πειραματική μέτρηση του κρίσιμου αριθμού μετάβασης στο επίπεδο τοίχωμα για σύγκριση των αποτελεσμάτων.

$Re_{critical}$	$2b\text{ (mm)}$	$L\text{ (mm)}$	Τοίχωμα
3.73	0	0	επίπεδο
4.53	1	2	ημίτονο
6.24	2	12	ημίτονο
8.99	10	50	ημίτονο
5.20	0.2	12	ορθογωνικό
9.26	0.8	12	ορθογωνικό
7.40	2	20	ορθογωνικό
5.40	0.2	24	ορθογωνικό

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα ανάλυσης ευστάθειας σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα- προτάσεις

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία στα πλαίσια του μεταπτυχιακού διπλώματος. Αντικείμενο της μελέτης ήταν η ανάλυση ευστάθειας του υγρού υμένα υπό ορισμένες πειραματικές συνθήκες. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι έξι παράγοντες: α) η επίδραση του πλάτους του καναλιού, β) το μέγεθος και η μορφή της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής, γ) η επίδραση του τοιχώματος και δ) η επίδραση της συχνότητας της εισακτέας διαταραχής.

5.1 Συμπεράσματα

Χρησιμοποιήθηκε η αγωγιμομετρική τεχνική για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας. Η συγκεκριμένη τεχνική έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα μιας και η ακρίβειά της ήταν της τάξεως των 1-2 μm .

Πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων για να προσδιοριστεί η ευστάθεια της ροής του υγρού υμένα υπό την επίδραση κάποιων συγκεκριμένων παραγόντων. Τα αρχικά πειράματα έλαβαν χώρα στο επίπεδο τοίχωμα. Έγιναν πειράματα όπου εξετάσθηκε το μέγεθος και το είδος της εξωτερικά επιβαλλόμενης διαταραχής. Αρχικά η μορφή της διαταραχής είχε τη μορφή κατακόρυφου υδραυλικού άλματος με δύο διαφορετικά πλάτη (20 μm και 50 μm). Όλα τα πειράματα που έγιναν με αυτές τις διαφορετικές διαταραχές κατέληξαν στα ίδια αποτελέσματα για την ευστάθεια του υμένα. Ελέγχθηκε επιπλέον η επίδραση της μορφής της διαταραχής. Σε αυτή την περίπτωση η διαταραχή είχε τη μορφή ημίτονου. Από τις πειραματικές μετρήσεις προέκυψε ότι η μετάβαση από την ευσταθή στην ασταθή περιοχή παραμένει ανεπηρέαστη από το είδος της διαταραχής. Ελέγχθηκε επίσης η επίδραση της συχνότητας διαταραχής στην ευστάθεια του υμένα. Χρησιμοποιήθηκαν οκτώ τιμές της συχνότητας (0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75 και 2.00 Hz) και έγιναν μετρήσεις τόσο στην ασταθή όσο και στην ευσταθή περιοχή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συχνότητα της διαταραχής δεν επηρεάζει τον κρίσιμο αριθμό Reynolds (Re_{crit}).

Τέλος μελετήθηκε συστηματικά η επίδραση του πλάτους στον κρίσιμο αριθμό μετάβασης. Έγιναν μετρήσεις σε δύο διαφορετικά πλάτη καναλιού των οποίων η τιμή ήταν ίση με το $1/3$ και $2/3$ του αρχικού πλάτους. Αποδείχθηκε ότι η μείωση του πλάτους δρα σταθεροποιητικά στη ροή καθώς όσο μικρότερο είναι το πλάτος του καναλιού τόσο μεγαλύτερος γίνεται ο αριθμός μετάβασης.

Μία ακόμη πτυχή της εργασίας ήταν η ανάλυση ευστάθειας του υγρού υμένα σε περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Έγιναν μετρήσεις σε ημιτονοειδές και σε ορθογωνικό τοίχωμα διαφόρων χαρακτηριστικών διαμόρφωσης. Το πρώτο συμπέρασμα που εξήχθη ήταν η σταθεροποιητική δράση του περιοδικά διαμορφωμένου τοιχώματος στη ροή υγρού υμένα. Το δεύτερο, ήταν η εξάρτηση του κρίσιμου αριθμού μετάβασης από το μέγεθος της διαμόρφωσης. Αποδείχθηκε ότι όσο πιο μεγάλη είναι η διαμόρφωση του τοιχώματος τόσο πιο σταθερή είναι η ροή. Τέλος αποδείχθηκε ότι και στα συγκεκριμένα τοιχώματα η συχνότητα της διαταραχής δεν επηρεάζει τον κρίσιμο αριθμό Reynolds.

5.2 Προτάσεις

Η μελέτη της ευστάθειας του υγρού υμένα έχει πραγματοποιηθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο στο επίπεδο όσο και στο περιοδικά διαμορφωμένο τοίχωμα. Ωστόσο, αυτό που μπορεί να μελετηθεί είναι η μορφή του κύματος και η εξέλιξη του κατάντη της ροής. Κάτι τέτοιο θα ήταν δυνατό με χρήση ρευστών λειτουργίας με διαφορετικό ιξώδες και διαφορετικές τιμές επιφανειακής τάσης. Στο μεγάλο κανάλι του εργαστηρίου μπορούν να γίνουν πειράματα ώστε να δημιουργηθούν κύματα εξ' αιτίας φυσικού θορύβου και να μελετηθεί η μορφή τους με χρήση διαφορετικών διαλυμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ♦ **Βλαχογιάννης Μ.** 2001 Διδακτορική Διατριβή, «Πειραματική μελέτη της ροής υγρού υμένα πάνω σε επίπεδο και σε κυματοειδές τοίχωμα»
- ♦ **Βλαχογιάννης Μ. & Μποντόζογλου Β.**, Πειραματική μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς μοναχικών κυμάτων σε ροή υγρού υμένα. *3ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής*, Αθήνα, Μάιος 2001
- ♦ **Βλαχογιάννης Μ. & Μποντόζογλου Β.**, Πειραματική μελέτη των αλληλεπιδράσεων σολιτονικών κυμάτων σε ιξώδη ροή υγρού υμένα. *“Ημερίδα: Ερευνητικές δραστηριότητες στα φαινόμενα ροής ρευστών στην Ελλάδα, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Μάιος 2000*
- ♦ **Andritsos N.** (1986) Effect of Pipe Diameter and Liquid Viscosity on Horizontal Stratified Flow. Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana
- ♦ **Argyriadi K., Vlachogiannis M. and Bontozoglou V.** (2006). Experimental study of inclined film flow along periodic corrugations: The effect of wall steepness. *Physics of Fluids* 18, p. 012102.
- ♦ **Benjamin T. B.** (1957). Wave formation in laminar flow down an inclined plane. *Journal of Fluid Mechanics* 2, p. 554.
- ♦ **Bontozoglou, V. & Papapolymerou, G.** 1997 “Laminar flow down a wavy incline”. *Int. J. Multiphase Flow* 23, 69-79.
- ♦ **Chang H. C., Demekhin E. and Kalaidin E.** (1995). Interaction dynamics of solitary waves on a falling film. *Journal of Fluid Mechanics* 294, p. 123.
- ♦ **Dassori, C. G., Deiber, J. A. & Cassano, A. E.** 1984 “Slow two-phase flow through a sinusoidal channel”. *Int. J. Multiphase Flow* 10, 181-193.
- ♦ **Drazin P. G.** "Introduction to Hydrodynamic Stability" Cambridge University Press, 2002.
- ♦ **Kang, F. & Chen, K.**, 1995 “Gravity-driven two-layer flow down a slightly wavy periodic incline at low Reynolds numbers”. *Int. J. Multiphase Flow* 21, 501-513
- ♦ **Liu J., Paul J. D. and Gollub J. P.** (1993). Measurements of the primary instabilities of film flows. *Journal of Fluid Mechanics* 250, p. 69.
- ♦ **Malamataris, N. T. & Bontozoglou, V.** 1999 “Computer aided analysis of viscous film flow along an inclined wavy wall”. *J. Comp. Physics*. 154, 372-392.

- Malamataris N, Vlachogiannis M. & Bontozoglou V.** 2002 *Solitary waves on inclined films: Flow structure and binary interactions*. *Phys. Fluids*, 14, 1082-1094.
- Pozrikidis, C.** 1988 "The flow of a liquid film along a periodic wall". *J. Fluid Mech.* 188, 275-300
- Shetty, L. & Cerro, R. L.** 1993 "Flow of a thin film over a periodic surface". *Int. J. Multiphase Flow* 18, 495-51
- Trifonov, YU. YA.** 1998a "Viscous liquid film flows over a periodic surface". *Int. J. Multiphase Flow* 24, 1139-1161.
- Trifonov, YU. YA.** 1998b "Viscous liquid film flows over a vertical corrugated surface and waves formation on the film free surface". In 3rd *Intl. Conf. on Multiphase Flow* Lyon, France.
- Vlachogiannis M. & Bontozoglou V.** 2001 *Observations of solitary wave dynamics of film flows*. *J. Fluid Mech.*, 435, 191-215
- Vlachogiannis M. & Bontozoglou V.** 2002 Experiments on laminar film flow along a corrugated wall. *J. Fluid Mech.*, 457, 133-156.
- Wang, C.-Y.** 1981 "Liquid film flowing slowly down a wavy inclined". *AIChE J.* 27,
- Wierschem A, Scholle M, Aksel N,** Vortices in film flow over strongly undulated bottom profiles at low Reynolds numbers *PHYSICS OF FLUIDS* 15 (2): 426-435 FEB 2003
- Wierschem A, Lepski C, Aksel N,** Effect of Bottom Undulations on the Film Thickness in Gravity Driven Flow *ACTA MECHANICA* 179 (1-2): 41-66 2005
- Wierschem A, Aksel N,** Influence of inertia on eddies created in films creeping over strongly undulated substrates *PHYSICS OF FLUIDS* 16 (12): 4566-4574 DEC 2004 .
- Yih C. S.** (1963). Stability of liquid flow down an inclined plane. *Physics of Fluids* 6, p. 321. 207-212.
- Zhao L. & Cerro R.L.** 1992 "Experimental Characterization of Viscous Film Flows over Complex Surfaces". *Int. J. Multiphase Flow* 18, 495-516.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



0040000975 10